



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR  
Engenharia

# Avaliação do desempenho de misturas betuminosas recicladas temperadas com emulsão betuminosa

Fátima Andreia Gomes Bispo

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

Orientadora: Prof. Doutora Marisa Sofia Fernandes Dinis de Almeida

Covilhã, junho de 2013



Aos meus Pais e Irmã



# Agradecimentos

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

A realização deste trabalho só foi possível devido à colaboração, dedicação e acompanhamento de diversas pessoas e entidades, a quem gostaria de expressar o meu agradecimento:

À Universidade da Beira Interior, pelos meios e condições colocados à disposição.

À Professora Doutora Marisa Sofia Dinis de Almeida, orientadora científica, pela disponibilidade, pela boa disposição sempre presente, pelas importantes sugestões, pelo incentivo ao longo do trabalho experimental e importantes ensinamentos.

À CEPISA Portuguesa, pelo fornecimento da emulsão betuminosa e do betume.

À CEPISA-PROAS Betumes, pela disponibilidade para a analisar o material fresado proveniente da EN346.

Ao Sr. Albino Alves e ao Sr. António Félix, assistentes técnicos dos laboratórios do Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura da UBI, pela boa disposição transmitida, incentivo e valioso apoio prestado ao longo do trabalho experimental.

Às minhas queridas colegas e amigas, pelo companheirismo, incansável apoio, incentivo, amizade e ensinamentos preciosos em todos estes anos.

À minha família, por todos os ensinamentos de vida e por todo o apoio transmitido para que eu pudesse chegar até aqui.



# Resumo

## AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE MISTURAS BETUMINOSAS RECICLADAS TEMPERADAS COM EMULSÃO BETUMINOSA

Os pavimentos rodoviários são o suporte do desenvolvimento de qualquer país, sendo necessário fazer intervenções de conservação ou reabilitação mesmo antes de atingirem o final do período de vida para o qual foram projetados ou construídos. Estando concluída grande parte da rede rodoviária nacional planeada, tem surgido uma enorme preocupação com o número elevado de estradas em serviço que necessitam de ser reabilitadas.

A construção de pavimentos consome energia, recursos naturais e produz gases com efeito de estufa em elevada quantidade, sendo a diminuição destes um grande desafio da sociedade atual. No entanto, para colmatar estes efeitos, houve necessidade de adotar novas medidas que sejam benéficas numa perspetiva de sustentabilidade técnico-económica-ambiental.

Neste contexto, surgiram as misturas betuminosas recicladas temperadas, estas são fabricadas a temperaturas mais reduzidas que o fabrico de misturas a quente e consistem no aproveitamento até 100% das matérias-primas existentes no pavimento degradado, reduzindo ainda mais os gastos energéticos e o recurso de agregados naturais no fabrico da nova mistura. Esta constitui uma técnica inovadora, ainda pouco utilizada, pelo que o presente trabalho constitui um contributo para a sua maior viabilidade em relação ao comportamento mecânico e desempenho em serviço, para que possa incentivar a sua aplicação, visto que traz inúmeros benefícios à sociedade, à economia e ao ambiente.

O objetivo principal deste trabalho é realizar uma análise comparativa do desempenho de uma mistura betuminosa a quente (mistura convencional) com misturas betuminosas recicladas temperadas, com incorporação de material fresado proveniente de duas estradas distintas (EN346 e A23). Assim, produziu-se em laboratório uma mistura betuminosa a quente (mistura de referência) com agregados novos e 5% de betume 35/50, duas misturas betuminosas temperadas com 100% de material fresado (EN346 e A23), uma mistura com 80% de material fresado (EN346) e 20% de agregados novos, e uma mistura com 90% da material fresado (A23) e 10% de agregados novos. As misturas betuminosas recicladas temperadas produziram-se com 2%, 3% e 4% de emulsão betuminosa Reciemul 90, sendo posteriormente submetidos ao ensaio de rigidez de tração em compressão diametral para se obter o teor ótimo de emulsão. Assim, produziram-se lajetas com 3% de emulsão, de forma a validar o desempenho mecânico das misturas betuminosas recicladas temperadas.

Concluiu-se que as misturas betuminosas recicladas temperadas têm um desempenho semelhante ao das misturas convencionais a quente, embora careçam de um cuidado acrescido na sua temperatura de produção e compactação.

## Palavras-chave

Reciclagem de pavimentos; Misturas betuminosas temperadas; Emulsão betuminosa; Resistência à fadiga; Resistência às deformações permanentes

# ABSTRACT

## PERFORMANCE EVALUATION OF WARM MIXTURES RECYCLED ASPHALT WITH BITUMINOUS EMULSION

The road pavements are the support to the development of any country, being necessary to intervene for the preservation or rehabilitation just before reaching the end of the life for which they were designed or constructed. Being completed much of the planned road network, has emerged a huge concern about the high number of roads under service that need to be rehabilitated.

The pavements construction consumes energy, natural resources and produces high amounts of greenhouse gases, being the reduction of such effects a major challenge for today's society. However, to offset these effects, there was a need to adopt new measures that are beneficial from the perspective of sustainability techno-economic-environmental.

In this context emerged the warm mixtures recycled asphalt, they are fabricated at temperatures lower than the manufacture of the hot mixtures and consist up to 100% of the recovery of raw materials occurring in degraded floor, further reducing energy costs and the use of natural aggregates to the manufacture of the new mixture. This is an innovative technique, yet little used, so this work is a contribution to their greater viability compared to the mechanical behavior and performance in service, to encourage its implementation, since it brings numerous benefits to society, economy and environment.

The main objective of this work is to perform a comparative analysis of the performance of a hot bituminous mixture (conventional mixture) with warm mixtures recycled asphalt incorporating milled material from two separate roads (A23 and EN346). Thus was produced in the laboratory a hot bituminous mixture (reference mixture) with new aggregates and 5% of bitumen 35/50, two tempered bituminous mixtures with 100% milled material (EN346 and A23), a mixture with 80% of milled material (EN346) and 20% of new aggregates, and a mixture of 90% of the milled material (A23) and 10% of new aggregates. The warm mixtures recycled asphalt were produced with 2%, 3% and 4% bitumen emulsion Reciemul 90, and then subjected to the test for tensile stiffness in the diametrical compression to obtain the optimum emulsion content. Were produced slabs great for an optimum content of 3% emulsion in order to validate the mechanical performance of the warm mixtures recycled asphalt.

It was concluded that the warm mixtures recycled asphalt have a performance similar to conventional hot mixtures, although they need a greater care in their temperature of production and compaction.

## KEYWORDS

Pavement recycling; Warm Mixtures Asphalt; Bitumen emulsion; Fatigue resistance; Resistance to permanent deformation.

# Índice Geral

## **CAPITULO 1 - Introdução**

1.1 Enquadramento	1
1.2 Objetivos	2
1.3 Organização do trabalho	3

## **CAPITULO 2 - Reciclagem de pavimentos**

2.1 Enquadramento	5
2.2 Misturas recicladas a frio	7
2.3 Misturas recicladas a quente	8
2.4 Misturas recicladas temperadas	10

## **CAPITULO 3 - Misturas betuminosas temperadas**

3.1 Introdução	13
3.2 Breve história das misturas betuminosas temperadas	13
3.3 Benefícios das misturas betuminosas temperadas	15
3.3.1 Benefícios sociais	16
3.3.2 Benefícios técnicos	17
3.3.3 Benefícios ambientais	17
3.3.4 Benefícios económicos	18
3.4 Desvantagens das misturas betuminosas temperadas	19
3.5 Tecnologias para a produção de misturas betuminosas temperadas	20
3.5.1 Aditivos orgânicos	22
3.5.2 Aditivos químicos	22
3.5.3 Espuma de betume com minerais sintéticos ou naturais	24
3.5.4 Espuma de betume por injeção de água	25
3.6 Legislação das misturas betuminosas temperadas	26

## **CAPITULO 4 - Caracterização do comportamento mecânico das misturas betuminosas**

4.1 Introdução	27
4.2 Caracterização do comportamento à fadiga	28
4.2.1 Enquadramento	28
4.2.2 Fatores de causam o fenómeno de fadiga	30
4.2.3 Ensaios laboratoriais para caracterizar a resistência à fadiga	31
4.2.3.1 Ensaio de flexão em dois pontos	31
4.2.3.2 Ensaio de flexão em três pontos	32
4.2.3.3 Ensaio de flexão em quatro pontos	32
4.2.3.4 Ensaio de tração indireta ou compressão diametral	33
4.3 Caracterização do comportamento à deformação permanente	34
4.3.1 Enquadramento	34
4.3.2 Fatores que causam a deformação permanente	35
4.3.3 Consequências da deformação permanente	38
4.3.4 Ensaios laboratoriais para caracterizar a resistência à deformação permanente	39
4.3.4.1 Ensaios empíricos	39
4.3.4.2 Ensaios fundamentais	39
4.3.4.3 Ensaios de corte	40
4.3.4.4 Ensaios de simulação em pistas de laboratório	41
4.4 Caracterização da sensibilidade à água	44

## **CAPÍTULO 5 - Estudo experimental**

5.1 Introdução	45
5.2 Metodologia de formulação das misturas betuminosas	46
5.2.1 Considerações gerais	46
5.2.2 Caracterização dos materiais utilizados	49
5.2.2.1 Caracterização dos materiais novos	49
5.2.2.2 Caracterização do material fresado	55
5.2.3 Determinação do teor de betume envelhecido do material fresado	58
5.2.4 Determinação da composição base das misturas betuminosas	59
5.2.4.1 Composição granulométrica das misturas betuminosas	60
5.2.4.2 Estimativa da percentagem de ligante	61

5.2.4.3 Determinação da percentagem ótima de emulsão betuminosa	64
5.3 Avaliação do desempenho das misturas betuminosas	69
5.3.1 Caracterização da resistência à deformação permanente	69
5.3.2 Caracterização da resistência à fadiga	74
5.3.3 Ensaio de sensibilidade à água (ITSR)	80
<b>CAPÍTULO 6 - Conclusões e trabalhos futuros</b>	
6.1 Conclusões	85
6.2 Trabalhos futuros	87
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	89



# Índice de Figuras

## CAPÍTULO 2 - Reciclagem de pavimentos

Figura 2.1 - Classificação das misturas betuminosas em função da temperatura de produção	6
Figura 2.2 - Fases da reciclagem a frio <i>in situ</i> com emulsão betuminosa	7
Figura 2.3 - Fases de reciclagem a quente <i>in situ</i>	9
Figura 2.4 - Esquema do processo de reciclagem temperatura em central	10

## CAPÍTULO 3 - Misturas betuminosas temperadas

Figura 3.1 - Desenvolvimento sustentável	16
Figura 3.2 - Esquema de produção de espuma de betume	24

## CAPÍTULO 4 - Caracterização do comportamento mecânico das misturas betuminosas

Figura 4.1 - Evolução do fendilhamento por fadiga	29
Figura 4.2 - Limite da fadiga	30
Figura 4.3 - Equipamento para ensaio de flexão de vigas em 4PB-PR	33
Figura 4.4 - Esquemática das diferentes causas de formação de rodeiras	34
Figura 4.5 - Evolução da repartição modal do transporte de mercadorias na EU, previsão até 2030	36
Figura 4.6 - Zonas climáticas de Portugal Continental	37
Figura 4.7 - Equipamento <i>Wheel tracking</i> (DECA-UBI)	43

## CAPÍTULO 5 - Estudo experimental

Figura 5.1 - Organigrama da metodologia geral de formulação de misturas betuminosas recicladas a quente	47
Figura 5.2 - Organigrama da metodologia de formulação	48
Figura 5.3 - Agregados	50
Figura 5.4 - Curvas granulométricas dos agregados incorporados nas misturas	51
Figura 5.5 - Pavimento do troço da EN346 em processo de fresagem	55
Figura 5.6 - Curvas granulométricas do material fresado e do fuso adotado	57
Figura 5.7 - Método de incineração em mufla	58

Figura 5.8 - Curvas granulométricas das misturas recicladas temperadas e da mistura betuminosa a quente	61
Figura 5.9 - Produção de provetes cilíndricos	65
Figura 5.10 - Provetes cilíndricos submetidos ao ensaio de rigidez à tração em compressão diametral (ITSM)	65
Figura 5.11 - Ensaio de rigidez à tração em compressão diametral (DECA-UBI)	66
Figura 5.12 - Variação do módulo de rigidez (compactação a 70 °C)	67
Figura 5.13 - Sequência da produção/compactação das lajetas para o ensaio à deformação permanente	70
Figura 5.14 - Equipamento pequeno acondicionado ao ar (Procedimento B)	71
Figura 5.15 - Aspeto das lajetas após o ensaio de resistência à deformação permanente	71
Figura 5.16 - Deformação máxima obtida pelo ensaio de simulação de pista ( <i>Wheel tracking</i> ) em laboratório	72
Figura 5.17 - Produção e compactação da lajeta com o cilindro de rolos	74
Figura 5.18 - Serragem das vigas prismáticas em laboratório (DECA-UBI)	75
Figura 5.19 - Vigas prismáticas obtidas através da serragem das lajetas	75
Figura 5.20 - Preparação das vigas prismáticas para se calcular a baridade	75
Figura 5.21 - Princípios básicos para o ensaio de resistência à fadiga em quatro pontos de flexão (4PB-PR)	76
Figura 5.22 - Equipamento inserido numa câmara climática ligado a um sistema servo hidráulico	78
Figura 5.23 - Leis de fadiga para as vigas prismáticas	79
Figura 5.24 - Ensaio de sensibilidade à água: provetes submetidos a vácuo e provetes imersos em à água	81
Figura 5.25 - Provede submetido ao ensaio de resistência à tração em compressão diametral	82
Figura 5.26 - Tipos de roturas dos provetes	83
Figura 5.28 - Aspeto do provete após o ensaio de tração indireta	83

# Índice de Quadros

## CAPÍTULO 3 - Misturas betuminosas temperadas

Quadro 3.1 - Redução de emissões, em percentagem, na produção de misturas betuminosas temperadas	18
Quadro 3.2 - Resumo das principais tecnologias de produção das misturas betuminosas temperadas	21

## CAPÍTULO 4 - Caracterização do comportamento mecânico das misturas betuminosas

Quadro 4.1 - Principais tipos de ensaios de avaliação do módulo de rigidez e da resistência à fadiga	31
Quadro 4.2 - Temperaturas para avaliação da resistência à deformação permanente em Portugal Continental	37
Quadro 4.3 - Tipos de ensaios de simulação em pistas de laboratório previstos na EN 12697-22:2003	42
Quadro 4.4 - Número de provetes de acordo com o tipo de equipamento	43

## CAPÍTULO 5 - Estudo experimental

Quadro 5.1 - Limites do fuso AC20 Base (MB)	49
Quadro 5.2 - Análise granulométrica dos agregados incorporados nas misturas	51
Quadro 5.3 - Massa volúmica e absorção de água dos agregados	53
Quadro 5.4 - Coeficiente de <i>Los Angeles</i>	53
Quadro 5.5 - Certificado de análise da emulsão betuminosa Reciemul 90	54
Quadro 5.6 - Certificado de análise do betume 35/50	55
Quadro 5.7 - Análise granulométrica do material fresado	56
Quadro 5.8 - Massa volúmica do material fresado com superfície seca	57
Quadro 5.9 - Teor de betume envelhecido do material fresado em laboratório (DECA-UBI)	58
Quadro 5.10 - Caracterização do betume envelhecido da A23 (Empresa Aurélio Martins Sobreiro & Filhos, S.A.)	59
Quadro 5.11 - Caracterização do betume envelhecido da EN346 (Proas - Betumes CEPSA)	59
Quadro 5.12 - Composição das diferentes misturas betuminosas (% de agregados)	60
Quadro 5.13 - Granulometria das misturas betuminosas recicladas temperadas e	60

das misturas betuminosas a quente	
Quadro 5.14 - Percentagens de betume novo e de betume total da mistura reciclada	62
Quadro 5.15 - Percentagem de emulsão betuminosa	63
Quadro 5.16 - Cálculo da penetração do ligante final	64
Quadro 5.17 - Baridade média dos provetes cilíndricos com 3% de emulsão betuminosa	68
Quadro 5.18 - Baridade média das lajetas moldadas para o ensaio à deformação permanente	70
Quadro 5.19 - Ensaio de simulação de pista - <i>Wheel tracking</i> (Procedimento B)	73
Quadro 5.20 - Declive máximo da rodeira a 45 °C (WTS) para o ensaio de simulação de pista	73
Quadro 5.21 - Baridade média das vigas prismáticas	76
Quadro 5.22 - Número de ciclos do ensaio de resistência à fadiga	78
Quadro 5.23 - Coeficientes obtidos pela lei de fadiga	79
Quadro 5.24 - Resistência conservada em tração indireta dos provetes cilíndricos	83

# Lista de Acrónimos

2PB-TR	Two-point bending test on trapezoidal specimens
3PB-PR	Three-point bending test on prismatic shaped specimens
4PB-PR	Four-point bending test on prismatic shaped specimens
AAPA	Australian Asphalt Pavement Association
AASHTO	American Association of State Highway and Transport Official
APAO	Asphalt Pavement Association of Oregon
CAIR	Clean Air Interstate Rule
CALTRANS	California Department of Transportation
CE EP	Caderno de Encargos das Estradas de Portugal
CO	Monóxido de Carbono
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono
COV	Composto Orgânico Volátil
DECA	Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura
EAPA	National Asphalt Pavement Association
EUA	Estados unidos da América
FHWA	Federal Highway Administration
IT-CY	Indirect tensile test on cylindrical shaped specimens
ITSR	Indirect Tensile Strength Ratio
LDVT	Linear Variable Displacement Transducer
NAPA	National Asphalt Pavement Association
NAT	Nottingham Asphalt Tester
NCAT	Nacional Center for Asphalt technology
PRD	Profundidade média da rodeira
NOx	Óxidos de azoto
RAP	Reclaimed Asphalt Pavement
SO <sub>2</sub>	Dióxido de Enxofre
UBI	Universidade da Beira Interior
UCPRC	University of California Pavement Research Center
UCPRC	University of California Pavement Research Center
UE	União Europeia
WRAP	Waste and Research Accion Program
WTS	Taxa de deformação média, para o procedimento B.



# CAPITULO 1 - Introdução

## 1.1 Enquadramento

A implementação do Plano Rodoviário Nacional de 1985 promoveu a modernização da rede rodoviária nacional, através da construção de itinerários principais e complementares. Porém, o crescimento do tráfego pesado levou a um conseqüente aumento das solicitações impostas nos pavimentos rodoviários, levando a uma rápida degradação dos pavimentos rodoviários.

Desta forma, em Portugal têm-se vindo a verificar um crescimento de volume de obras de conservação e reabilitação de pavimentos rodoviários onde são utilizadas grandes quantidades de agregados naturais e emitidos gases com efeito de estufa.

Em 2005, a entrada em vigor do Protocolo de Quioto surge como um incentivo para atender às premissas da sustentabilidade, visando a redução das emissões de CO<sub>2</sub> e a diminuição do uso dos combustíveis fósseis pelos países industrializados.

A produção de misturas betuminosas convencionais (misturas betuminosas a quente) requer um importante consumo energético e produz efeitos negativos no ambiente e na saúde dos operários aquando a sua colocação em obra. Neste contexto, têm-se reunido esforços para adotar novas técnicas para a diminuição da temperatura das misturas betuminosas convencionais. A diminuição da temperatura potencia a diminuição da energia necessária para o seu fabrico, e implica reduções de 30 a 40% de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>), de 50% para os compostos orgânicos voláteis (COV), de 10 a 30% para o monóxido de carbono (CO), de 60 a 70% para os óxidos de azoto (NO<sub>x</sub>) e de 20 a 25% para as poeiras (FHWA, 2008).

A diminuição da temperatura requer gastos energéticos menores, podendo a redução chegar aos 35% do combustível gasto no aquecimento dos agregados. A redução da temperatura de fabrico, aplicação e compactação permite garantir as densidades desejadas. Permite ainda um ambiente de trabalho mais confortável favorecendo a produtividade dos trabalhadores aquando a colocação em obra.

Na Europa, todos os anos são produzidas cerca de 50 milhões de toneladas de misturas betuminosas recuperadas, que podem ser reutilizadas na produção de novas misturas betuminosas, sendo a Alemanha e a Itália os países que se salientam pela sua maior produção. Apesar de em alguns países a reutilização deste material ser uma prática usual há mais de 30 anos, noutros a sua utilização ainda é feita a uma escala muito reduzida (EAPA, 2008). No nosso país, quer em obras novas, quer em obras de reabilitação de pavimentos, geralmente aplicam-se misturas betuminosas a quente com recurso a agregados naturais, destacando-se

algumas obras rodoviárias com recurso à reciclagem das misturas betuminosas existentes. O material recuperado é frequentemente depositado em vazadouros, não lhe sendo dada qualquer utilização.

Para contrariar esta realidade, as crescentes preocupações ambientais têm levado a um incentivo por parte de diversas entidades, realizando estudos de forma a verificar o desempenho de pavimentos reciclados, como é o caso da reciclagem a quente que é desenvolvida e aplicada em vários países da Europa.

O presente trabalho incide sobre a reciclagem de pavimentos flexíveis a temperaturas mais reduzidas, visto que a rede rodoviária é constituída, em mais de 90%, por pavimentos flexíveis, tornando pertinente o estudo e aprofundamento do conhecimento das características e do comportamento das misturas betuminosas neste tipo de pavimentos.

No setor rodoviário as misturas betuminosas recicladas temperadas apresentam-se como uma solução inovadora e sustentável, com as principais vantagens de diminuir a temperatura de fabrico entre 30 a 40% e aproveitar até 100% as matérias-primas existentes no pavimento degradado. Atualmente ainda se colocam algumas questões acerca das misturas betuminosas recicladas temperadas, e para que estas possam ser sob no mercado internacional e nacional é hoje um requisito essencial comprovar que o seu desempenho mecânico é idêntico ao das misturas betuminosas convencionais.

## 1.2 Objetivos

O objeto de pesquisa deste trabalho é a reabilitação sustentável de pavimentos flexíveis, através da reciclagem de pavimentos a uma temperatura mais reduzida (90 a 140 °C).

Neste sentido, o objetivo principal deste estudo é avaliar e garantir o bom desempenho de diferentes misturas betuminosas recicladas temperadas com emulsão betuminosa e demonstrar através de ensaios em laboratório que esta tecnologia inovadora pode ser executada com credibilidade, apresentando um desempenho mecânico idêntico ao das misturas fabricadas de uma forma convencional. Dado que esta técnica ainda é recente, esta investigação irá contribuir com uma nova visão de sustentabilidade para a sociedade atual, contribuindo para a implementação e divulgação desta técnica.

O trabalho experimental desenvolvido em laboratório (DECA-UBI) tem como objetivo a caracterização das misturas betuminosas recicladas temperadas produzidas com emulsão betuminosa e validação de uma metodologia de formulação adequada, tendo por base o ensaio de determinação do módulo de rigidez por compressão diametral, descrito na norma europeia EN 12697-26 (2004).

### 1.3 Organização do trabalho

O trabalho é constituído por seis capítulos, cuja organização e conteúdo se sintetiza nesta secção.

Neste primeiro capítulo introdutório, faz-se um enquadramento do tema em estudo, definem-se os principais objetivos da investigação e faz-se uma síntese da organização do trabalho.

No capítulo 2, faz-se uma breve apresentação das principais técnicas de reciclagem de pavimentos flexíveis, salientando os principais benefícios que estão associados às misturas recicladas temperadas.

No capítulo 3, abordam-se as misturas betuminosas temperadas. No âmbito destas misturas, é efetuada uma breve descrição das técnicas desenvolvidas na sua produção, sendo também realizada uma abordagem às principais vantagens e desvantagens associadas a estas técnicas.

No capítulo 4, faz-se a caracterização do comportamento mecânico das misturas betuminosas. Desta forma, faz-se uma breve descrição dos fenómenos que degradam os pavimentos e apresentam-se os principais ensaios em laboratório considerados para avaliar o comportamento mecânico referentes à resistência à fadiga, resistência à deformação permanente e sensibilidade à água.

No capítulo 5, apresenta-se o trabalho experimental desenvolvido em laboratório (DECA-UBI). Neste capítulo descreve-se todo o trabalho prévio de caracterização dos materiais utilizados (materiais novos e material fresado), estimativa do teor de betume envelhecido do material fresado, produção de provetes e determinação da percentagem ótima de emulsão betuminosa (através do ensaio de rigidez à tração em compressão diametral). Por fim, apresenta-se a descrição pormenorizada dos ensaios de desempenho realizados para avaliar as características mecânicas das misturas produzidas.

No capítulo 6 apresentam-se as principais conclusões obtidas ao longo do desenvolvimento experimental e possíveis trabalhos futuros.



## CAPÍTULO 2 - Reciclagem de pavimentos

### 2.1 Enquadramento

A reciclagem é uma das soluções possíveis para a reabilitação de pavimentos muito degradados.

Segundo Fonseca (2002), o objetivo fundamental da reciclagem de pavimentos é transformar um pavimento degradado numa estrutura homogénea e adaptada ao tráfego que deverá suportar. Consiste em reutilizar os materiais existentes na construção de uma nova camada, mediante a desagregação dos mesmos a uma certa profundidade, com a adição de um ligante (cimento, emulsão, betume), água (para a hidratação, mistura e compactação) e, eventualmente, novos agregados (como corretores granulométricos).

A técnica de reciclagem de pavimentos iniciou-se nos EUA em 1915. Uma quantidade considerável de pavimentos foi reciclada até à década de 30, principalmente pavimentos em meio urbano. Após esta década, a quantidade de obras com aplicação da técnica de reciclagem foi reduzindo, devido ao aumento de oferta de betume no mercado, o que tornava a construção de um novo pavimento mais económica que a reciclagem do mesmo (Mallick, 1997 citado por David, 2006).

Na década de 70, surge novamente motivação para a reciclagem de pavimentos, altura em que se viveu uma das maiores crises petrolíferas. Os preços atingidos pelo petróleo bruto nessa época, tal como hoje em dia, levaram a que as administrações do sector rodoviário tivessem em conta os custos crescentes do betume e dos combustíveis que influenciam diretamente os custos de fabrico, transporte e aplicação das misturas. Na Europa as misturas betuminosas recicladas lideram a lista de materiais reciclados, superando a sucata de ferro, e representa mais do que a soma de todos os restantes materiais reciclados (vidro, plástico, jornais e revistas). Nos EUA, também as misturas betuminosas representam uma percentagem elevada de material reciclado, cerca de 80% (Baptista, 2006). As misturas betuminosas recicladas podem ser aplicadas na obra de onde provêm ou em outras obras, sejam novas ou de reabilitação.

No nosso país, quer em obras novas, quer em obras de reabilitação de pavimentos, geralmente aplicam-se misturas betuminosas a quente com recurso a agregados naturais e betume. Em 2004, identificaram-se até à data, apenas quinze obras rodoviárias com recurso à reciclagem de pavimentos degradados (Martinho, *et al.*, 2004 citado por Baptista, 2006). Recentemente têm-se verificado algumas obras pontuais, assim como a execução de alguns

troços experimentais, executados com base em investigações. O material recuperado dos pavimentos é frequentemente depositado em vazadouros, não lhe sendo dada qualquer utilização. Em alternativa, costuma-se aplicar em caminhos, públicos ou privados, com tráfego reduzido.

A reciclagem é uma técnica inovadora no tratamento de pavimentos com problemas de fendilhamento, irregularidades ou outro tipo de patologias, apresentando-se como uma solução económica, relativamente às soluções tradicionais de reforço do pavimento. Estão ainda a ela associados, benefícios ecológicos e de proteção do meio ambiente, não sendo necessário recorrer a vazadouros e à extração de agregados novos.

As misturas betuminosas com recurso à reciclagem, testadas em vários países, dividem-se em quatro grupos: misturas betuminosas recicladas a frio, misturas betuminosas recicladas semi-temperadas, misturas betuminosas recicladas temperadas e misturas betuminosas recicladas a quente. Estas distinguem-se essencialmente na temperatura de produção (Figura 2.1).

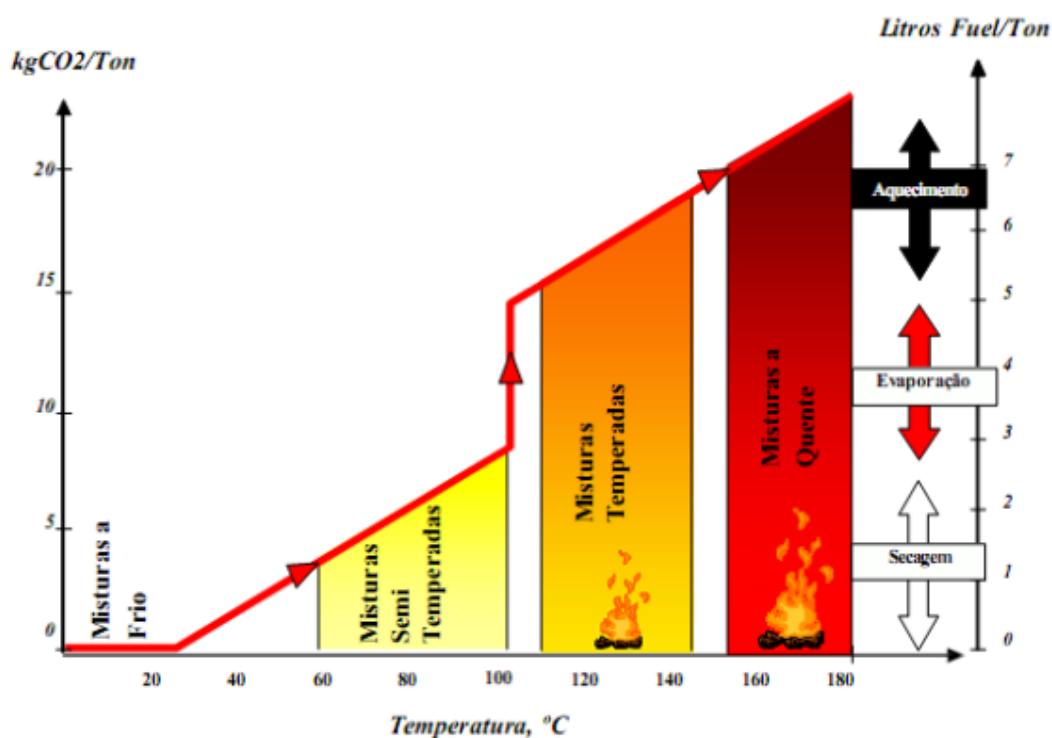


Figura 2.1 - Classificação das misturas betuminosas em função da temperatura de produção (Fonte: Ferreira, 2009)

As misturas recicladas a frio são fabricadas à temperatura ambiente, sendo o ligante adicionado, uma emulsão betuminosa.

As misturas semi-temperadas produzem-se entre os 60 e os 100 °C. A tecnologia base é a utilização da emulsão betuminosa ou espuma de betume de modo a obter-se a redução da viscosidade do ligante.

As misturas recicladas temperadas produzem-se entre os 110 e os 140 °C. A tecnologia base é a utilização da emulsão betuminosa, espuma de betume ou aditivos de modo a obter-se a redução da viscosidade do ligante.

As misturas a quente produzem-se entre os 150 e os 180°C. O ligante utilizado é o betume tradicional, ou um betume modificado com polímeros ou borracha.

A seguir apresenta-se uma breve descrição dos tipos de reciclagem mais utilizados, destacando-se as misturas betuminosas recicladas a frio, a quente e temperadas.

## 2.2 Misturas recicladas a frio

A técnica da reciclagem a frio *in situ* consiste na fresagem do pavimento a reabilitar, seguida da mistura do material fresado com uma emulsão betuminosa. Segue-se a colocação da mistura obtida sobre o suporte, utilizando um conjunto de equipamentos integrados no mesmo veículo e com as operações a serem realizadas sequencialmente. Logo após esta sequência de operações, deve ser realizada uma operação de compactação da camada resultante, com cilindros de pneus ou de rolo vibrante. É uma técnica utilizada em faixas largas com várias vias, quando se pretende apenas a reabilitação da via de veículos lentos, mantendo a circulação das restantes vias.

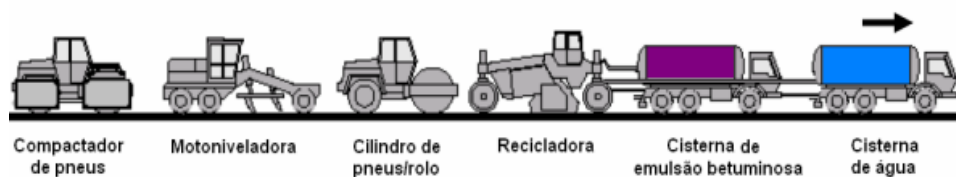


Figura 2.2 - Fases da reciclagem a frio *in situ* com emulsão betuminosa  
(Fonte: Wirtgen, 2004 citado por Batista, 2006)

Por questões económicas, a técnica de reciclagem *in situ* é a mais utilizada de entre as técnicas de reciclagem, pelo facto de permitir economizar novos materiais, o transporte de matérias, utilizar equipamentos integrados, tem menor tempo de execução e menor incómodo para os utentes (Oliveira, 2003 citado por Minhoto, 2005). Neste tipo de técnicas são ainda apontadas como vantagens a eliminação do fendilhamento, impedindo a futura

ocorrência de reflexão de fendas, permitindo realizar novas camadas de pavimentos mantendo a cota inicial (Pereira *et al.*, 2002).

A reciclagem *in situ* a frio, foi a primeira técnica a ser utilizada no nosso país, apresentando um maior desenvolvimento, visto que os equipamentos necessários são simples e de possível utilização noutros processos construtivos (InIR).

Na reciclagem a frio *in situ* com cimento, é adicionado para além do cimento, água, podendo eventualmente se adicionar aditivos e agregados novos. É especialmente indicada para pavimentos que apresentem uma forte insuficiência estrutural. Este processo representa uma boa alternativa para a reabilitação de pavimentos em avançado estado de deterioração estrutural. Deverão ser empregues equipamentos mecânicos que numa só operação fresem, incorporem cimento e água nas percentagens definidas, misturem o material fresado e procedam aplicação da mistura final (Batista, 2009).

A reciclagem *in situ* a frio com cimento e emulsão, é um processo misto que permite conseguir uma mistura com a resistência próxima à de um material reciclado com cimento. A introdução da emulsão confere uma maior flexibilidade e uma menor retração à mistura, diminuindo o módulo de deformabilidade da camada reciclada (Batista, 2009).

Na reciclagem a frio em central com emulsão betuminosa, o material é transportado para a central onde é misturado com a emulsão betuminosa à temperatura ambiente, seguindo-se o transporte e aplicação na obra de proveniência ou noutra obra. Tal como para a reciclagem *in situ*, existem limitações de ordem meteorológica, que devem ser tidas em conta durante o período de cura.

## 2.3 Misturas recicladas a quente

A reciclagem a quente consiste em fabricar uma mistura betuminosa a quente, quer em central, adaptando as centrais para misturas betuminosas a quente existentes, quer *in situ*, usando como agregado os materiais fresados de pavimentos degradados juntamente com um betume. As técnicas de reciclagem a quente diferem apenas no tipo de central, que pode ser móvel ou fixa, contínua ou descontínua e no processo de fabrico em central (Pereira *et al.*, 2002).

A reciclagem a quente *in situ* consiste no tratamento do pavimento existente com recurso a um “comboio” composto por dois pré-aquecedores, um aquecedor-fresador, um aquecedor-misturador, uma espalhadora tradicional e por um conjunto de compactadores, normalmente envolvendo cilindros de pneus e cilindros de rasto liso.



Figura 2.3 - Fases de reciclagem a quente *in situ* (Baptista,2006)

Na sequência de equipamentos pode ainda intercalar-se um caminhão, junto ao aquecedor-misturador, para a adição de materiais novos. Neste processo, o procedimento de aquecimento envolve a projeção sobre o pavimento de um conjunto de jatos, a alta pressão, de ar quente sobreaquecido a 600 °C. A reciclagem a quente *in situ* não tem tido grande implementação em Portugal, devido ao elevado custo dos equipamentos associados.

A reutilização dos materiais fresados pode ser realizada em circuito fechado, em que estes são usados sobre o pavimento de onde foram retirados, ou em circuito aberto, em que são aplicados sobre outros pavimentos. A escolha do ligante de regeneração é uma parte importante do processo pelo facto de recuperar as propriedades do ligante para a nova mistura.

A reciclagem em central fixa contínua tem a particularidade do aquecimento e secagem se efetuarem no mesmo local onde se realiza a mistura, tambor-secador-misturador. A central mais utilizada é a central de fluxo paralelo em que a chama de aquecimento segue o mesmo sentido dos agregados.

A reciclagem em central fixa descontínua inclui o método do RAP (*Reclaimed Asphalt Pavement*) a quente e o método *Recyclean*. No método RAP a quente o material fresado é pré-aquecido num tambor-secador suplementar. No método *Recyclean*, os agregados e o material fresado são introduzidos no mesmo tambor mas em zonas diferentes, de modo a que este seja aquecido atrás da chama, evitando o seu sobreaquecimento.

## 2.4 Misturas recicladas temperadas

Na reciclagem temperada em central (Figura 2.4) com emulsão betuminosa o material fresado do pavimento é transportado para a central, onde é misturado com a emulsão betuminosa à temperatura ambiente.



Figura 2.4 - Esquema do processo de reciclagem temperada em central  
(adaptado de Wirtgen, 2003 citado por Baptista, 2006)

A reciclagem temperada consiste na reciclagem do material fresado proveniente das camadas betuminosas dos pavimentos antigos, através do seu aquecimento entre 90 a 135 °C, e na adição de uma emulsão betuminosa adequada à temperatura ambiente. No fabrico destas misturas emprega-se uma emulsão betuminosa com cerca de 62% de ligante residual, que segundo estudos da Cepsa Portuguesa S.A., é capaz de envolver o material fresado sem escorrimentos, e sem se deteriorar pelo facto de a temperatura ser elevada e, ao mesmo tempo, proporcionar à mistura uma elevada coesão inicial, uma elevada adesividade ativa e passiva, bem como uma trabalhabilidade suficiente para a sua aplicação com espalhadoras convencionais (Vieira, 2003 citado por Batista, 2004).

O fabrico das misturas betuminosas recicladas temperadas com emulsão betuminosa, pode ser feito em centrais do mesmo tipo que as utilizadas no fabrico das misturas convencionais a quente, podendo incorporar até 100% de material fresado (Tavares e Vieira, 2006 citado por Batista, 2004). O aquecimento a que é submetido o material fresado permite que a abertura ao tráfego seja imediata, eliminando-se assim o período de cura necessário no caso da reciclagem a frio com emulsão (Baptista, 2006).

Esta técnica permite que o material fresado não seja submetido a temperaturas muito altas, evitando um maior envelhecimento do betume contido no fresado e a sua rápida degradação, visto que a temperatura tem efeito nas características reológicas do ligante, agravando o

estado de envelhecimento deste. Assim, quando se incorpora grande quantidade de material fresado, recomenda-se que a temperatura de produção seja entre 110 e 135 °C (Mallick *et al.*, 2008 citado por Motta, 2011). Neste contexto, a aplicação de misturas betuminosas temperadas favorece a introdução de maiores quantidades de fresados na produção, ainda assim, o menor envelhecimento do novo ligante incorporado à mistura pode ajudar no rejuvenescimento do betume contido no material fresado, aumentando a vida em serviço do pavimento quanto ao fendilhamento (Prowell *et al.*, 2007).

No âmbito deste estudo (Capítulo 5), as misturas betuminosas recicladas temperadas produziram-se com adição da emulsão betuminosa, Reciemul 90.

A emulsão betuminosa Reciemul 90 é um produto da empresa Cepsa Portuguesa Petróleos, S.A. Esta apresenta-se como uma emulsão betuminosa catiónica de rotura lenta, produzida a partir de betume aditivado. A Reciemul 90 apresenta características adequadas para aplicação em misturas betuminosas temperadas em central a temperaturas entre os 90 e 120 °C, sendo a temperatura de fabrico recomendada de 90 °C. A adição da emulsão pode variar entre a temperatura ambiente e os 60 °C. A Cepsa indica que esta emulsão permite uma adesividade de 90%, uma penetração (25 °C; 100g; 5s) de 330 0,1 mm.



## CAPÍTULO 3 - Misturas Betuminosas temperadas

### 3.1 Introdução

A redução da temperatura na produção de misturas betuminosas, é alvo de estudos à alguns anos. Vários autores têm dedicado esforços em prol da redução da temperatura, com o objetivo de diminuir a emissão de gases poluentes para a atmosfera, associados à pavimentação da rede viária. Estudos realizados nos EUA indicam o quanto é prejudicial para a saúde dos trabalhadores os efeitos das temperaturas elevadas, associados a fumos indesejáveis aquando a sua colocação em obra. Ao longo da última década têm-se utilizado aditivos de diferentes composições, no sentido de reduzir a tão desejada temperatura de fabrico, ainda que a sua aplicação em troços experimentais sejam relativamente recentes. Neste contexto, as misturas betuminosas temperadas surgiram como uma solução inovadora no setor rodoviário.

Ao longo deste capítulo serão apresentados os desenvolvimentos de maior importância das misturas betuminosas temperadas, assim como as tecnologias usadas por vários autores em diversos países e as vantagens e desvantagens associadas às misturas betuminosas temperadas.

### 3.2 Breve história das misturas betuminosas temperadas

Os primeiros relatos da possibilidade de diminuir a temperatura de produção das misturas betuminosas foram feitos em 1956 pelo Dr. H. Ladis Csanyi, professor da *Lowa State University*, que percebeu o potencial da espuma de betume como camada selante nos solos. Desde então, esta tecnologia é usada com muito sucesso em diversos países, permitindo a diminuição da temperatura de produção das misturas betuminosas (Kristjansdottir, 2006).

Na última década, tanto na Europa como nos EUA desenvolveram-se várias técnicas para se obter a redução de temperatura: uso de zeólitas (naturais ou sintéticas), parafinas, ceras e produtos orgânicos, que resultaram em vários produtos de marca comercial registada e técnicas de processamento (Budney, 2012).

As primeiras estradas construídas na Europa com misturas betuminosas temperadas datam de 1995, tendo sido construídas na Alemanha com adição de Aspha-Min®, um zeólito sintético, seguindo-se a aplicação desta tecnologia na Noruega e na Dinamarca.

Em 1996, o ministro do trabalho e das relações sociais da Alemanha realizou um inquérito sobre os limites de exposição dos trabalhadores aos fumos libertados pelo aquecimento do

betume. Perante a pressão do governo, foi criado o fórum de asfalto da Alemanha, com o objetivo de responder a este inquérito. Em resposta a este, foram realizados estudos e debates sobre os constituintes do betume, emissões de fumos, uso de equipamentos de proteção individual, epidemiologia, assim como tecnologias de forma a reduzir a temperatura de fabrico, colocação e compactação em obra (Nascimento *et al.*, 2008 citado por Budney, 2012).

Em 1996, através de uma parceria entre a *Shell Bitumem* e o empreiteiro *Kolo Weidekke* foram realizados os primeiros testes na Noruega com a tecnologia *Warm Mix Asphalt Foam Emulsion (WAM-Foam®)*.

Em 1997, na Alemanha foi realizado um troço experimental utilizando um ligante betuminoso modificado por parafina sintética (Ferreira, 2009).

A partir do ano 2000, os EUA começaram a interessar-se em promover estudos e aplicações desta tecnologia, visando a diminuição das temperaturas quando produzidas, espalhadas e compactadas, em relação às temperaturas das misturas convencionais (Budney, 2012).

No segundo *Eurasphalt & Eurobitume Congress*, realizado em 2000, Koenders *et al.* publicaram resultados obtidos em laboratório da tecnologia *Warm Mix Asphalt Foam Emulsion*, com base em testes realizados na Noruega, Reino Unido e Holanda entre os anos de 1996 e 1999. Nestes testes foram avaliadas mais de 1000 toneladas de misturas temperadas produzidas com espuma de betume, em diferentes períodos do ano, em estradas de tráfego com intensidade média. Os autores concluíram que este processo contribuiu para uma redução significativa da emissão de poeiras, fumos e CO<sub>2</sub>, além de uma economia de energia de 20 a 30%. Foram ainda apresentados resultados satisfatórios referentes ao comportamento mecânico.

Em 2002, a NAPA (*National Asphalt Pavement Association*) liderou uma visita de técnicos norte-americanos à Dinamarca, Alemanha e Noruega, visando a análise e o estudo das misturas betuminosas temperadas utilizadas nestes países. Desde essa data, também nos EUA, o interesse e desenvolvimento desta tecnologia cresceu de tal forma, que a FHWA (*Federal Highway Administration*) designou as misturas betuminosas temperadas como uma área de elevado interesse (Ferreira, 2009).

Em Março de 2005, a Agência de Proteção Ambiental publicou o *Clean Air Interstate Rule (CAIR)*, um conjunto de regulamentos que visam a melhoria drástica da qualidade do ar em 28 dos 50 estados dos EUA. Através do regulamento várias medidas foram implementadas, nomeadamente, com imposições para a redução da emissão de gases poluentes nas indústrias da construção. Neste sentido, foram reduzidos e fixados o número de horas e o período do dia de produção para as centrais (FHWA, 2008).

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 ao das misturas betuminosas convencionais (misturas betuminosas a quente). Também foram avaliados possíveis problemas relacionados com a baixa temperatura de compactação e de sensibilidade à água do pavimento. O trabalho deste grupo consistiu em realizar diversos ensaios de laboratório, de forma a avaliar problemas a curto, médio e longo prazo. Os resultados deste estudo mostraram maior conforto, dos trabalhadores, devido à menor temperatura de trabalho e à menor emissão de fumos. O estudo mostrou que este tipo de misturas não apresentou perdas nas propriedades analisadas, portanto a sua utilização é promissora (Jones, 2009 citado por Budney, 2012).

Em Maio de 2007, um grupo de investigadores americanos visitou quatro países Europeus (Bélgica, França, Alemanha e Noruega), no sentido de avaliarem e discutirem as diferentes tecnologias utilizadas na redução da temperatura das misturas betuminosas. Estes investigadores representavam agências governamentais (*American Association of State Highway and Transport Official - AASHTO*) e consultores privados (*Federal Highway Administration - FHWA*). Esta conferência consistiu num debate sobre as tecnologias utilizadas na Europa e nos EUA, com especial interesse pelo comportamento dos pavimentos a longo prazo (D'Angelo *et al.*, 2008).

### **3.3 Benefícios da utilização de misturas betuminosas temperadas**

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

O conceito de desenvolvimento sustentável traduz-se num plano de desenvolvimento global, que incorpora os aspetos ambientais, económicos e sociais. A sua aplicação envolve a redução da emissão de gases com efeito de estufa, a conservação de recursos naturais e a possibilidade de incorporar misturas betuminosas recuperadas, economicamente mais vantajosas, sem comprometer o futuro das gerações. Desta forma, houve necessidade de adotar novas medidas, benéficas, numa perspetiva de sustentabilidade técnico-económica-ambiental.



Figura 3.1 - Desenvolvimento sustentável (Fonte: D'Angelo *et al.*, 2008)

### 3.3.1 Benefícios sociais

#### - Melhores condições de trabalho

Vários estudos observaram o perigo a que os trabalhadores estavam sujeitos, quando expostos aos odores e vapores do betume. Estes são prejudiciais à saúde, causando irritações nos olhos, nas vias nasais e na garganta.

Ensaio realizados, durante a produção, de misturas betuminosas temperadas para medir a exposição aos fumos a que os trabalhadores das centrais e das equipas de pavimentação estavam sujeitos, indicam uma redução de fumos de 30 a 50%, comparativamente com as misturas betuminosas convencionais. Desta forma, é garantida uma melhor qualidade do ar e um ambiente de trabalho mais confortável. Com estas melhorias, um empreiteiro na Alemanha verificou um aumento de produtividade na colocação de misturas betuminosas temperadas, pela redução significativa da temperatura de produção e compactação (D'Angelo *et al.*, 2008).

#### - Menores restrições na construção

No que diz respeito à colocação em obra deste tipo de misturas, a sua menor temperatura de fabrico permite garantir uma trabalhabilidade adequada, na sua aplicação e compactação, obtendo as densidades desejadas.

A capacidade de transporte e aplicação a longas distâncias, e a possibilidade de abertura ao tráfego sobre a mistura recém-compactada, proporcionam agradáveis benefícios sociais (FHWA, 2008). Ainda assim, o aumento da distância de transporte possibilita a execução de remendos e a aplicação de camadas mais regulares, com melhor qualidade, devido ao menor arrefecimento verificado nas misturas (Budney, 2012). As misturas betuminosas temperadas favorecem a sua aplicação em regiões geográficas mais frias ou em épocas de clima frio.

### 3.3.2 Benefícios técnicos

#### - Menor envelhecimento do ligante

As altas temperaturas têm efeito negativo sobre o betume e podem causar alterações reológicas substanciais no ligante, levando a um aumento de sua rigidez. Quando o ligante é mantido a temperaturas acima de 150 °C, mesmo que por períodos relativamente curtos (menores que um minuto), este pode sofrer envelhecimento significativo com a exposição ao ar e a perda de voláteis (Brown *et al.*, 2009 citado por Motta, 2011).

As tecnologias para a produção de misturas betuminosas temperadas permitem o menor envelhecimento do ligante e reduzem a suscetibilidade ao fendilhamento térmico e estrutural (Prowell *et al.*, 2006).

#### - Melhor compactação

As tecnologias de produção destas misturas permitem a incorporação de uma elevada percentagem de material reciclado, na medida em que a redução da viscosidade do ligante facilita o processo de compactação (D'Angelo *et al.*, 2008).

### 3.3.3 Benefícios ambientais

#### - Menor emissão de poluentes atmosféricos

Ao permitir a incorporação de elevadas quantidades de misturas betuminosas recuperadas (RAP - *Reclaimad asphalt Pavement*) é conseguida uma maior preservação dos recursos naturais. Numa publicação do programa WRAP (*Waste and Research Accion Program*), do Reino Unido, foi assinalado que a inclusão de apenas 14% de RAP nas misturas betuminosas reduz as emissões de carbono em 4%, sendo conseguida uma redução global do impacto no meio ambiente de 9% (Nynas, 2009 citado por Ferreira, 2009).

Alguns dados indicam reduções significativas da emissão de gases tóxicos prejudiciais ao ambiente. Desta forma, a redução de energia necessária para o seu fabrico, implica reduções de 30 a 40 % dos valores de emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>), 50% dos compostos orgânicos voláteis (COV), 10% a 30% do monóxido de carbono (CO), 60% a 70% de óxidos de azoto (NO<sub>x</sub>) e 20% a 25% de poeiras. O Quadro 3.1 apresenta valores referentes á redução de emissões em vários Países.

Quadro 3.1- Redução de emissões, em percentagem, na produção de misturas betuminosas temperadas (adaptado FHWA, 2008)

Emissões	Noruega	Itália	Holanda	França
CO <sub>2</sub>	31,5	30 – 40	15 – 30	23
SO <sub>2</sub>	ND	35	ND	18
COVs	ND	50	ND	19
CO	28,5	10 – 30	ND	ND
NO <sub>x</sub>	61,5	60 – 70	ND	18 *
Pó	54,0	25 – 55	ND	ND

A produção de misturas betuminosas temperadas permitirá ainda aos construtores dos países que são signatários do Protocolo de Quioto contribuírem para o seu cumprimento, uma vez que as empresas deverão desenvolver tecnologias que permitam a produção de misturas betuminosas mais ecológicas e que possam contribuir para a proteção do meio ambiente (Brosseaud and Jacques, 2008 citado por Ferreira, 2009).

#### - Maior conservação de recursos naturais

Devido a obras de construção e conservação de pavimentos, produzem-se anualmente grandes quantidades de material fresado, que pode ser recuperados e incorporado nas misturas como agregados. Na Europa, todos os anos são produzidas cerca de 50 milhões de toneladas destes materiais, que ao serem reutilizados não são depositados em vazadouros ou aterros (EAPA, 2008).

### 3.3.4 Benefícios económicos

#### - Redução do consumo de combustível

A redução da temperatura de produção em central tem por consequência uma redução significativa do consumo de combustíveis (APAO, 2003).

De acordo com Prowell *et al.* (2008), cálculos teóricos indicam que reduções de 28 °C podem resultar em poupanças de combustível de aproximadamente 11%. Dados de relatórios de diversos projetos indicam poupanças de combustível de 20 a 35% na produção destas misturas (combustível gasto no aquecimento dos agregados nos queimadores). Estes valores poderão ser superiores se a combustão for otimizada, visto que, os níveis de poupança de combustível dependem de vários fatores, tais como as reduções de temperatura efetivamente praticadas, o teor em água dos agregados e as condições de funcionamento da central. Medições efetuadas permitem concluir que aumentos de 1% no teor em água dos agregados aumentam o consumo de combustível em 10%.

**- Redução do consumo de agregados naturais**

A indústria europeia de agregados (incluindo produção de betão, pavimentação de estradas e construção de caminhos de ferro) produziu em 2009 cerca de 3000 milhões de toneladas de agregados naturais, extraídos de 23000 explorações. O valor direto desta produção ronda os 20 a 25 mil milhões de euros (UEPG, 2010 citado por Dinis-Almeida, 2010). Através do reaproveitamento do material fresado é possível diminuir os custos associados à extração de agregados naturais, conseguindo assim reduzir o custo total da obra em relação às misturas convencionais.

**- Adaptação às instalações existentes**

O facto de não serem necessárias alterações em centrais de misturas betuminosas a quente, incentiva a utilização desta técnica. Verifica-se ainda que as centrais estão sujeitas a uma degradação menor devido às temperaturas mais reduzidas (Zaumanis, 2010).

**- Controlo eficaz de custos**

O custo referente à produção de misturas betuminosas temperadas depende da tecnologia adotada, dado que algumas tecnologias exigem gastos iniciais mais elevados.

A melhoria da qualidade do ambiente de trabalho, com conseqüente aumento do rendimento dos trabalhadores, permite o cumprimento ou a diminuição dos prazos associados à concretização da pavimentação.

### **3.4 Desvantagens da utilização de misturas betuminosas temperadas**

Além dos benefícios associados a estas tecnologias, verificam-se algumas desvantagens relativamente aos diversos produtos existentes no mercado, visto que cada produto possui uma composição diferente.

De acordo com Zaumanis (2010), entre as desvantagens e cuidados provenientes da utilização de misturas betuminosas temperadas, destacam-se as seguintes:

- Dados insuficientes para validar ou rejeitar algumas das técnicas ou produtos que têm vindo a ser testados, uma vez que alguns dos pavimentos executados com essas técnicas são ainda recentes;

- Alguns aditivos que fazem uso de ceras na sua composição, não apresentam um comportamento satisfatório a temperaturas atmosféricas muito baixas. Isto é explicado pela cristalização das ceras, pois estas tendem a aumentar a viscosidade e a rigidez do ligante;
- Algumas tecnologias de produção de misturas betuminosas temperadas obrigam à aquisição de novos equipamentos para as centrais;
- A aquisição destes aditivos constitui um custo acrescido. É, portanto, necessário efetuar uma análise cuidada, garantindo que as poupanças obtidas superam os custos adicionais, poupanças, essas, que serão tanto maiores, quanto maiores forem as reduções nas temperaturas de produção. É necessário verificar se o consumo reduzido de energia é suficiente para diminuir os custos globais de produção;
- A produção de misturas betuminosas temperadas permite a redução das emissões. Contudo, para a produção destas misturas é necessário utilizar aditivos e a produção desses aditivos gera emissões;
- As tecnologias de produção de misturas betuminosas temperadas com espuma de betume, estão associadas à incorporação de água na fase inicial do processo. Devido à possibilidade de não se verificar a vaporização completa da água durante a fase de mistura e durante a fase da pavimentação, podem ocorrer problemas de fissuração do pavimento e assentamentos prematuros causados pela presença de água residual. Embora nestas misturas se utilizem aditivos químicos para melhorar o envolvimento e adesão, a humidade existente pode causar problemas.

### **3.5 Tecnologias para a produção de misturas betuminosas temperadas**

Atualmente, nas misturas betuminosas utilizam-se várias técnicas de redução da viscosidade efetiva do ligante. Estas permitem o revestimento dos agregados durante a fase de mistura, aplicação e compactação a baixas temperaturas. De acordo com vários autores, as técnicas de produção das misturas betuminosas temperadas subdivide-se em quatro grandes grupos:

- Aditivos orgânicos
- Aditivos químicos
- Espumas com minerais sintéticos ou naturais
- Espuma com injeção de água

No Quadro 3.2, resumem-se as principais tecnologias de fabrico das misturas betuminosas temperadas, descrevendo-se, dentro de cada grupo aquelas que mais se utilizam.

Quadro 3.2 - Resumo das principais tecnologias de produção de misturas betuminosas temperadas

(Fonte: Adaptado de Ferreira, 2009)

Tecnologia	Empresa proprietária da patente	Gama de temperatura de fabrico (°C)
<b>ADITIVOS ORGÂNICOS</b>		
Sasobit® (Ficher-Tropsch wax)	Sasol Wax GmbH, Alemanha	Depende da gama de penetração do ligante, mas habitualmente entre os 130 e os 170 °C
Asphaltan B® (Cera de Montana, estéril de baixo peso molecular)	Remonta GmbH, Alemanha	
Licomont BS 100®	Clariant, Suíça	
<b>ADITIVOS QUÍMICOS</b>		
Rediset®	Akzo Nobel, Holanda	Reduções de cerca de 15 °C da temperatura referência das MBQ
Cecabase®	CECA, França	120 - 140 °C
Interlow T®	Interchimica, Itália	120 - 140 °C
Evotherm	MeadWestvaco, EUA	85 - 115 °C
Revix ou Evotherm 3G®	MeadWestvaco Mathy-Ergon, EUA	130 - 140 °C
<b>ESPUMAS DE BETUME COM MINEIRAIS SINTÉTICAS OU NATURAIS</b>		
Aspha-Min® (Zeólito sintético)	MHI Group e Eurovia Services GmbH, Alemanha	Depende da gama de penetração do ligante, mas habitualmente entre os 130 e os 170
Advera® (Zeólito sintético)	PQ Corporation, EUA	
Zeólito Natural	Vários	-
<b>ESPUMA DE BETUME POR INJEÇÃO DE ÁGUA</b>		
WAM Foam®	Shell, UK, e Kolo-Veidekke, Noruega	110 - 120 °C
Terex WMA System	Terex, EUA	130 °C
Double - Barrel® Green	Astec Industries, EUA	121 - 135 °C
LEA - Low Energy Asphalt (EBT® e EBT®)	LEA - CO(Join-Adventure Eiffage/Fairco para divulgar a LEA). Nos EUA os direitos de utilização são da McConnaughay	< 100 °C
LT Asphalt® (LEA)	Nynas, Suécia	110 - 115 °C
LEAB®	Royal BAM Group, Holanda	
Ultrafoam GX®	Gencor Industries, EUA	

### 3.5.1 Aditivos Orgânicos

De acordo com a D'Angelo *et al.* (2008), diferentes tipos de aditivos orgânicos podem ser utilizados para diminuir a viscosidade do ligante a temperaturas acima do ponto de amolecimento das ceras, que é cerca de 90 °C. Os aditivos orgânicos mais utilizados nas misturas betuminosas são: o Sasobit®, Asphaltan® e Licomont® BS 100.

A Sasobit® é uma das adições mais utilizadas do mundo, devido às vantagens associadas à sua empregabilidade nas misturas betuminosas. Esta é uma adição com capacidade de diminuição da viscosidade e melhoramento da trabalhabilidade quando apresentada no estado líquido. São reconhecidas as características de melhoramento da compatibilidade desta adição com as misturas betuminosas, sendo frequentemente adicionada numa percentagem de 3 a 4% (Pereira, 2010; Prowell *et al.*, 2005b).

O Asphaltan® B é uma adição extraída do carvão através de um solvente de tolueno. Esta adição possui uma elevada estabilidade e insolubilidade em água, costuma ser adicionado numa percentagem de 2 a 4% ao betume, possuindo um ponto de fusão de aproximadamente de 100 °C, permitindo melhorar as características das misturas betuminosas para temperaturas mais reduzidas. Ainda assim, aumenta a compatibilidade e a resistência às deformações permanentes (Corigan, 2008).

A Licomont® BS 100 apresenta-se como um melhorador das propriedades físicas do betume e da mistura, permitindo a redução da viscosidade e da temperatura da mistura. Deste modo, reduz a penetração do betume e o aumento da temperatura de amolecimento, contribuindo para uma maior resistência ao tráfego pesado, reduzindo as deformações impostas no pavimento e aumentando o tempo de vida útil do mesmo. O produtor não apresenta uma percentagem ideal de aditivo para adicionar ao betume (Pereira, 2010).

### 3.5.2 Aditivos Químicos

O processo de produção de misturas betuminosas temperadas com recurso a aditivos químicos, surfatantes (nome da terminologia inglesa *surface active agent*) ou tensoativos, não assentam na redução da viscosidade do ligante. Estes visam a melhoria do recobrimento do agregado pelo ligante, mesmo a baixas temperaturas (Prowell *et al.*, 2006).

Alguns dos aditivos químicos mais utilizados nas misturas betuminosas temperadas são: o Rediset™WMX, o Cecabase RT®, Iterlow®T, o Evotherm™ e o Revix™/Evotherm™ 3G, apresentando-se em seguida uma breve descrição destes.

O Evotherm® apresenta-se como uma solução na redução das emissões de CO<sub>2</sub> durante a pavimentação rodoviária. A percentagem frequentemente utilizada é de 0,5%, podendo ser inserido diretamente numa emulsão betuminosa de elevado teor de betume (aproximadamente 70%) (Powell *et al.*, 2006). Este aditivo permite realizar a mistura a uma temperatura entre 85 e 115 °C (Prowell *et al.*, 2007 citado por Pereira, 2010). Quando ocorre o processo da mistura, a água liberta-se sob a forma de vapor devido ao contacto com os agregados aquecidos, proporcionando-lhes um bom revestimento.

O Rediset® WMX é um aditivo constituído por uma combinação de surfatantes químicos e orgânicos, que modificam a reologia do ligante. Em estudos realizados verificaram-se reduções de aproximadamente 15 °C na temperatura de fabrico, sendo que as percentagens de incorporação deste aditivo variam entre 1,5 a 2,0% do peso do ligante. Este aditivo melhora as propriedades da afinidade do betume ao agregado, podendo prolongar a vida útil do pavimento. As suas características, antioxidantes, permitem maior resistência ao envelhecimento do betume (Chowdhury and Button, 2008 citado por Ferreira, 2009).

O Revix® atua devido à presença de uma variedade de componentes na sua composição, como agentes tensioativos ou surfatantes, ceras, auxiliares do processo químico, 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 *et al.*, 2008).

O Cecabase® é constituído por uma base de agentes tensioativos ou agentes de superfície que, quando misturados com o betume, permitem reduzir até 45 °C a temperatura de compactação da mistura e não obriga a quaisquer modificações na central de produção da mistura (Ferreira, 2009). A incorporação deste aditivo, em quantidades entre 0,2 e 0,4% da massa do betume, permite a redução da temperatura de aplicação para cerca de 120 °C e, ao mesmo tempo, a manutenção das propriedades de um pavimento convencional produzido entre 160 a 180 °C (CECA 2010 citado por Pereira, 2010).

O Iterlow® T é um aditivo no estado líquido que quando adicionado ao betume permite produzir misturas betuminosas a baixas temperaturas. O produtor recomenda a adição de uma quantidade de 0,3 a 1,0% de aditivo ao betume, de modo a obter uma temperatura de produção entre 90 e 120 °C. O aditivo apenas funciona como um agente tensioativo, não modificando as propriedades químicas ou físicas do betume (temperatura de amolecimento, penetração e viscosidade) e é estável durante a fase de armazenamento (Iterchimica, 2010 citado por Pereira, 2010).

### 3.5.3 Espuma de betume com minerais sintéticos ou naturais

Nas técnicas de espuma utilizam-se zeólitos (naturais ou sintéticos) ou água para a produção da espuma. Existem diversos processos/equipamentos com recurso à água para a produção do betume espuma, destacando-se os processos de duas fases (líquida e gasosa).

De acordo com Virta (2008), existem mais de 40 tipos de zeólitos naturais identificados nos últimos 200 anos, distinguidos pelas diferenças na sua composição química e arranjo da sua estrutura cristalina (Ferreira, 2009).

Os zeólitos são constituídos por cadeias de silicatos com grandes espaços vazios na sua estrutura, que permitem a presença de grandes catiões como o sódio, o cálcio e as moléculas de água. Este tipo de material caracteriza-se como sendo um material com grande capacidade de absorção e perda de água sem que ocorra alteração da sua estrutura cristalina (Prowell *et al.*, 2006). Os zeólitos naturais diferenciam-se dos zeólitos sintéticos, pelo processo químico que envolve a produção de zeólitos sintéticos, mas principalmente pela taxa sílica/alumínio, que nas naturais é estabelecida uma proporção de 5:1 e nas sintéticas é de 1:1.

Este tipo de processo mostra-se eficaz para os betumes convencionais, betumes modificados, entre outros, podendo ainda ser utilizado na reciclagem de pavimentos. Os ganhos energéticos rondam os 30% e uma redução na emissão de gases para a atmosfera na ordem dos 60%.

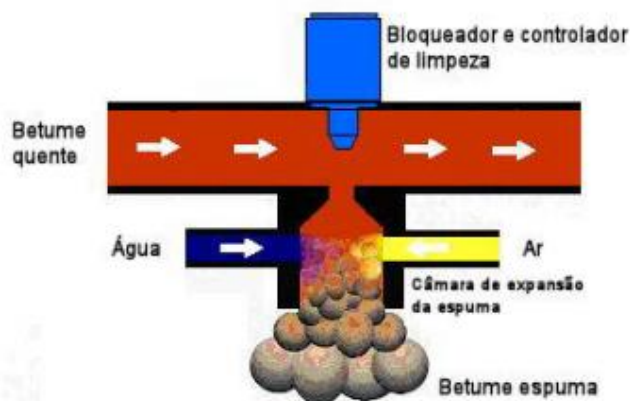


Figura 3.2 - Esquema de produção de espuma de betume (Wirtgen, 2004 citado por Pereira, 2010)

Os Zeólitos Sintéticos mais utilizados são: Aspha-min® e Advera®. A adição de Aspha-Min® à mistura ao mesmo tempo que o ligante, origina uma pulverização de água. Esta libertação de água cria uma expansão de volume no ligante, que resulta em espuma de betume. Adiciona-se frequentemente uma taxa de 0,3% de Aspha-min® em massa da mistura, o que pode resultar numa redução da temperatura aproximadamente de 54 °C (Corrigan, 2008; Prowell, *et al.*, 2005a). O Advera® adiciona-se numa percentagem de 0,25% em massa da mistura.

### 3.5.4 Espuma de betume por injeção de água

Na presença de betume quente, uma pequena quantidade de água (cerca de 2% sobre a massa do betume) transforma-se em vapor. A rápida expansão da água, de líquido em vapor, cria bolhas de betume preenchidas com vapor de água, denominadas espumas de betume. No estado espumoso, a viscosidade do betume é reduzida, permitindo o recobrimento dos agregados a temperaturas de mistura mais reduzidas (Croteau and Tessier, 2008 citado por Ferreira, 2009). A seguir apresentam-se de forma breve as tecnologias com base em espuma de betume mais utilizadas.

Atualmente existe uma gama diversificada deste tipo de aditivos, dos quais se destacam a seguir os mais utilizados.

O processo WMA-Foam® usa um sistema de adição de dois tipos de ligante em duas fases distintas durante a produção, um dos ligantes é mole e outro é duro. Tratando-se de um processo e não de uma adição, de um novo tipo de material (FHWA, 2008). Na primeira fase o betume mole é misturado com o agregado a uma temperatura de 100 °C, obtendo-se um pré-revestimento do agregado. Numa segunda fase é inserido o betume duro quente combinado com água fria, a espuma resultante permite um maior envolvimento com o agregado a baixas temperaturas. O processo permite obter temperaturas entre 100 e 120 °C na fase de mistura e temperaturas entre 80 e 110 °C na fase de compactação (Pereira, 2010). O sucesso da WAM-Foam® depende da escolha criteriosa dos betumes moles e duros.

Seguindo a mesma linha das técnicas apresentadas anteriormente, a tecnologia Terex® WMA trata da produção de misturas temperadas pela formação de espuma de betume, esta técnica diminui a temperatura da mistura, reduz emissões, melhora a flexibilidade e reduz os custos. O sistema de injeção diminui a temperatura da mistura até 32,2 °C, o que pode diminuir o consumo de combustível até 22%.

O Double-Barrel® consiste num dispositivo de duplo tambor cilíndrico utilizado para a produção de espuma de betume através da combinação de uma pequena quantidade de água com betume. Com este dispositivo são referidas reduções de consumo de combustível de 14% no aquecimento dos agregados e um aumento de 14% na produção (Astecinc, 2010 citado por Pereira, 2010).

O LT-Asphalt® é uma solução para a produção de misturas betuminosas a temperaturas próximas dos 100 °C, utilizando um aditivo hidrofílico (0,5 a 1,0% da massa do betume) na produção do betume espuma. Permite que as misturas possuam até 7% de betume, enquanto as soluções idênticas presentes no mercado apenas podem usar até 3% de betume. De acordo com o produtor, a uma temperatura de 60 °C é possível efetuar-se a compactação da mistura, revelando uma trabalhabilidade idêntica à das misturas betuminosas a quente (Nynas 2010, citado por Pereira, 2010).

### **3.6 Legislação das misturas betuminosas temperadas**

Em Portugal, as misturas betuminosas temperadas com emulsão betuminosa encontram-se abrangidas no Caderno de Encargos das Estradas de Portugal.

## CAPÍTULO 4 - Caracterização do comportamento mecânico das misturas betuminosas

### 4.1 Introdução

Nas últimas décadas tem-se reconhecido a necessidade de melhorar o desempenho estrutural dos pavimentos rodoviários flexíveis, para fazer face às mudanças que se fizeram sentir ao longo do tempo. A diminuição da qualidade funcional de um pavimento está relacionada com o aumento do número de veículos a circular na rede rodoviária, o aumento da velocidade de circulação e o aumento das cargas por eixo.

O comportamento e a capacidade resistente dos materiais do pavimento diminuem ao longo do tempo e dependem de dois tipos de fatores: os “ativos” são diretamente responsáveis pela deterioração do pavimento, destacando-se a ação do tráfego e do clima, e os “passivos”, como a qualidade de produção das misturas ou a qualidade de construção do pavimento (Lopes, 2009).

As ações de tráfego resultam da aplicação das cargas dos veículos, sendo aplicada uma pressão vertical uniforme numa área considerada circular. A intensidade e a forma de aplicação das cargas dos veículos implicam determinados comportamentos no pavimento, principalmente pelos materiais betuminosos apresentarem comportamentos distintos ao serem solicitados. O tráfego pesado é a principal causa de deformação, dado que provoca irregularidades no perfil longitudinal e transversal do pavimento.

As ações climáticas, representadas pelas temperaturas e pela água, desempenham um fator importante e influenciam de uma forma preponderante a sua degradação. Desta forma, a temperatura do ar, a radiação solar e a velocidade do vento à superfície do pavimento, constituem uma ação sobre o pavimento, alterando as propriedades mecânicas e a durabilidade dos materiais. O teor em água, proveniente do exterior ou da fundação do pavimento, interfere claramente no nível da resistência que o pavimento oferece quando solicitado pelas cargas impostas pelo tráfego. As águas que se infiltram na estrutura do pavimento devem ser escoadas através de um sistema de drenagem. A forma mais eficaz de evitar a influência da água nos pavimentos deverá passar pela utilização de materiais com baixa sensibilidade à água e o dimensionamento do pavimento considerando o efeito do teor em água nos módulos de deformabilidade (Mendes, 2011).

Do ponto de vista estrutural o fendilhamento por fadiga e a formação de cavados de rodeiras (deformação permanente) são os principais mecanismos de ruína considerados para o dimensionamento dos pavimentos. O estudo do comportamento é realizado em laboratório

com o auxílio de equipamentos adaptados, estes representam as condições a que os pavimentos betuminosos são expostos durante a vida útil. Os ensaios permitem determinar as características de deformabilidade associadas à mistura. O conhecimento das propriedades mecânicas tem uma grande importância quer a nível da formulação quer a nível do dimensionamento de pavimentos flexíveis.

## 4.2 Caracterização do comportamento à fadiga

### 4.2.1 Enquadramento

A resistência à fadiga das misturas betuminosas é um aspeto fundamental no desempenho dos pavimentos. O fendilhamento por fadiga é uma das principais causas de deterioração dos pavimentos, representando em muitos casos, a sua degradação inicial.

As cargas aplicadas ao pavimento não provocam a imediata rutura da estrutura. No entanto, a sua repetição possui efeito acumulativo, o que podem levar à rotura do material (Perret, 2003 citado por Otto, 2009).

A resistência à fadiga de uma mistura betuminosa é definida como a capacidade de resposta da mistura às ações do tráfego e climáticas, sem que se verifique o seu fendilhamento (Pais *et al.*, 2002 citado por Dias, 2009). O fenómeno do fendilhamento pode ser definido consoante a sua origem, dividindo-se em 3 tipos principais:

- Fendilhamento devido a variações térmicas,
- Fendilhamento por reflexão de fendas,
- Fendilhamento por fadiga.

O fendilhamento devido a variações térmicas surge devido às diferentes temperaturas que ocorrem nos ciclos dia/noite, levando desta forma ao endurecimento da mistura, tornando-a mais suscetível ao aparecimento de fendas.

O fendilhamento por reflexão de fendas, verifica-se quando é colocada uma camada betuminosa de reforço sobre outra que se encontrava fendilhada. Este facto deve-se ao diferente comportamento das duas camadas quando sujeitas às ações do tráfego (Miranda, 2007 citado por Dias, 2009).

De acordo com a teoria clássica da fadiga, o fendilhamento por fadiga está associado ao carregamento cíclico do tráfego, este tem início na base das camadas betuminosas, zona em que existem os maiores esforços de tração, e propagam-se no sentido da superfície do pavimento, à medida que vão sendo aplicados os ciclos de carga. Este tipo de fendilhamento

ocorre na zona de passagem dos rodados dos veículos, e verifica-se na direção de circulação do tráfego (Molenaar *et al.*, 1997 citado por Minhoto, 2005).

Este fenómeno é um processo muito rápido, visto que à medida que as fissuras se vão verificando, existe uma aceleração da propagação das degradações e conseqüentemente um enfraquecimento progressivo da estrutura do pavimento. Isto deve-se à entrada de água pelas fissuras existentes à superfície, que entre outros, potencia o fenómeno de extração de finos, transformando o processo num acontecimento cíclico, em que uma degradação favorece o aparecimento de outras fissuras.

Quando é visível um fendilhamento expressivo à superfície da camada de desgaste, diz-se que o pavimento se encontra numa fase de degradação avançada. A propagação do fendilhamento da base das camadas betuminosas começa por conduzir a um fendilhamento longitudinal, surgindo no local de maiores tensões de tração, correspondendo ao local de passagem dos rodados dos veículos no pavimento. Posteriormente surgem novas fendas longitudinais e transversais, dando origem a blocos denominados de “pele de crocodilo”, potenciando o seu desprendimento da camada, transformando o pavimento numa superfície sem a adequada comodidade e segurança para os utilizadores da via em que circulam.



Figura 4.1 - Evolução do fendilhamento por fadiga (Fonte: Dias, 2009)

O comportamento da fadiga depende do nível de sollicitação para todos os materiais. Em alguns casos, é possível observar que abaixo de um determinado valor de amplitude de sollicitação o material poderá não sofrer rotura, ou seja, este poderá ser sollicitado infinitas vezes ou um valor experimentalmente muito grande sem observar a rotura. Este valor de amplitude de sollicitação chama-se limite de fadiga ou limite de resistência do material (De la Roche, 1996 citado por Silva, 2006). A figura 4.2 representa o limite de fadiga para um determinado valor de amplitude de sollicitação.

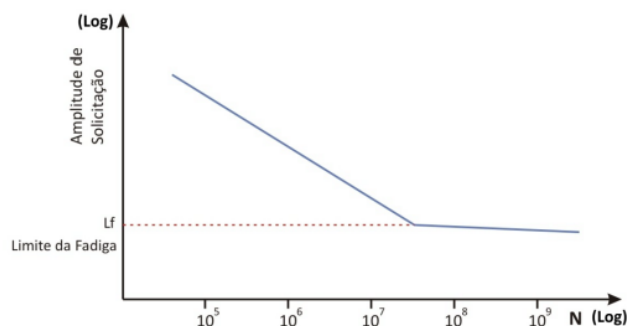


Figura 4.2 - Limite da Fadiga

Para definir a resistência à fadiga avalia-se a redução do módulo de rigidez para metade do seu valor inicial. Existem vários métodos para a determinação da resistência à fadiga que simulam um estado de tensão semelhante às condições existentes *in situ*. Estes métodos envolvem uma variedade de técnicas de ensaio, tipos de equipamentos, configuração, tipo e modo de carregamento, condições de ensaio e procedimentos de análise.

#### 4.2.2 Fatores que causam o fenómeno de fadiga

O baixo teor de betume provoca um aumento da rigidez da mistura, tornando-a mais suscetível a sofrer fendilhamento, visto que diminuem as propriedades viscoelásticas da mistura betuminosa, o que provoca igualmente a segregação dos agregados devido ao menor envolvimento das partículas pelo betume. É importante referir que a utilização de betumes com menor viscosidade pode atenuar este facto.

O volume de vazios elevados provoca uma diminuição da capacidade estrutural da mistura, visto que, existem maiores espaços entre as partículas sem estarem preenchidos pelo betume, podendo provocar da mesma forma, uma diminuição da resistência à fadiga e potenciando a segregação superficial dos agregados. As baixas temperaturas de serviço provocam o endurecimento da mistura, tornando-a mais suscetível ao fendilhamento.

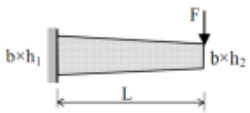
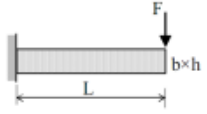
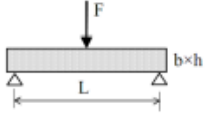
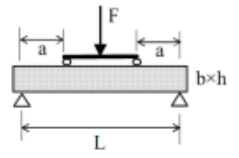
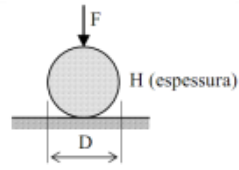
A ação do tráfego de veículos pesados e o aumento da pressão de enchimento dos pneus, para fazer face ao aumento da carga transportada, provoca uma maior concentração de tensões nos bordos laterais dos pneus, que irá acentuar o aumento de tensões nas zonas laterais dos rodados dos veículos, surgindo desta forma o fendilhamento com origem à superfície longitudinal no pavimento (Baladi *et al.*, 2003 citado por Dias, 2009).

### 4.2.3 Ensaio laboratoriais para caracterizar a resistência à fadiga

Para determinar a resistência à fadiga das misturas betuminosas foram desenvolvidos vários equipamentos, estes realizam diferentes tipos de ensaios de flexão simples. O mais utilizado atualmente, e que apresenta maiores vantagens perante os restantes ensaios existentes, é o ensaio de flexão em quatro pontos (4PB-PR). Nesse tipo de ensaio de flexão, as cargas são aplicadas ao provete em quatro pontos, dois de apoio (reações) e dois de carregamento (ações).

As normas europeias EN 12697-26, *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 26: Stiffness* e a EN 12697-24, *Bituminous mixtures - Test Methods for hot mix asphalt - Part 24: Resistance to fatigue*, descrevem os principais tipos de ensaios, resumidos no Quadro 4.1.

Quadro 4.1 - Principais tipos de ensaios de avaliação do módulo de rigidez e da resistência à fadiga

Tipo de ensaio	Tipo de provete	Designação	Esquema de ensaio
Ensaio de flexão em dois pontos	Prismático trapezoidal	2PB-TR ( <i>two-point bending test on trapezoidal specimens</i> )	
Ensaio de flexão em dois pontos	Prismático rectangular (vigas)	2PB-PR ( <i>two-point bending test on prismatic shaped specimen</i> )	
Ensaio de flexão em três pontos	Prismático rectangular (vigas)	3PB-PR ( <i>three-point bending test on prismatic shaped specimen</i> )	
Ensaio de flexão em quatro pontos	Prismático rectangular (vigas)	4PB-PR ( <i>four-point bending test on prismatic shaped specimens</i> )	
Ensaio de tração indirecta ou compressão diametral	Cilíndrico	IT-CY ( <i>Indirect tensile test on cylindrical shaped specimens</i> )	

#### 4.2.3.1 Ensaio de flexão em dois pontos

No ensaio de flexão em dois pontos usam-se provetes prismáticos trapezoidais ou retangulares (vigas). No ensaio de flexão em dois pontos (um ponto de carga e um ponto de apoio) a carga

é aplicada em consola sobre os provetes trapezoidais (2PB-TR, *two-point bending test on trapezoidal specimens*) ou sobre vigas (2PB-PR, *two-point bending test on prismatic shaped specimens*). O ensaio de flexão em provete trapezoidal em consola é muito utilizado em França e na Bélgica. O equipamento de ensaio é constituído por um sistema elétrico, de aplicação de cargas na extremidade livre do provete trapezoidal em consola, registando a força aplicada e o deslocamento sofrido pela mesma extremidade através de um transdutor de deslocamentos e o número de ciclos de carga aplicados (Dinis-Almeida, 2010).

#### **4.2.3.2 Ensaio de flexão em três pontos**

O ensaio de flexão em três pontos (dois pontos de apoio e um ponto de carga), com carregamento central das vigas simplesmente apoiadas (3PB-PR, *three-point bending test on prismatic shaped specimens*) também se encontra descrito na norma EN 12697-24. Este ensaio apenas pode ser utilizado em misturas betuminosas com dimensão máxima do agregado de 22 mm, sendo previstas dimensões dos provetes de 300×50×50 mm. Aquando da realização do ensaio, a tensão máxima de tração verifica-se na secção do provete localizada sob a carga aplicada. A existência de uma imperfeição numa outra secção do provete pode levar a que a rotura não ocorra na secção de tração máxima (Dinis-Almeida, 2010).

#### **4.2.3.3 Ensaio de flexão em quatro pontos**

O ensaio de flexão simples em quatro pontos (dois pontos de apoio e dois pontos de carga), com carregamento em dois pontos das vigas simplesmente apoiadas (4PB-PR, *four-point bending test on prismatic shaped specimens*), é o ensaio mais utilizado em Portugal.

O ensaio consiste na aplicação de um carregamento sinusoidal repetido, através de um sistema que agarra o provete, sendo permitida a inversão do sentido da carga e, conseqüentemente, recuperando-se a deformação produzida pelos sucessivos carregamentos. A deformação máxima sofrida pelo provete é medida por um transdutor do tipo LVDT (*Linear Variable Displacement Transducer*) que fica localizado a meio vão da viga permitindo obter, através da teoria da elasticidade, a determinação da extensão máxima de tração instalada na secção transversal a meio vão (Dinis-Almeida 2010).



Figura 4.3 - Equipamento para ensaio de flexão de vigas em 4PB-PR (DECA-UBI)

#### 4.2.3.4 Ensaio de tração indireta ou compressão diametral

O ensaio de tração indireta ou compressão diametral (IT-CY, *Indirect tensile test on cylindrical shaped specimens*) está preconizado na EN 12697-26:2004 - *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part26: Stiffness*.

O ensaio é realizado no equipamento *Nottingham Asphalt Tester* (NAT). Este é composto por um sistema de aplicação de cargas com funcionamento hidráulico ou pneumático e uma célula de carga, que mede o valor da força aplicada numa das geratrizes do provete cilíndrico, através de transdutores do tipo LVDT, localizados no plano horizontal perpendicularmente ao plano de carga.

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.

Os principais componentes deste equipamento de ensaio são um sistema de apoio do provete e dos transdutores, um sistema pneumático de carregamento do provete constituído por célula de carga, um sistema regulador de pressão e reservatório de ar e uma câmara climatizada com controlo de temperatura.

Neste ensaio o provete fica sujeito a tensões de tração, o que faz com que as propriedades do betume assumam uma importância superior (Gardete, 2006).

## 4.3 Caracterização do comportamento à deformação permanente

### 4.3.1 Enquadramento

As deformações permanentes das misturas betuminosas podem ter origem no solo de fundação ou à superfície dos pavimentos flexíveis sujeitos a tráfego muito intenso, mais precisamente na zona da passagem dos rodados de veículos pesados (cavados de rodeiras).

A deformação permanente no pavimento é comum nos primeiros anos de vida, enquanto o betume é jovem e apresenta uma menor viscosidade. Após o endurecimento e oxidação do betume, devido à exposição a fatores ambientais, este tende a apresentar maior viscosidade, tornando-se mais resistente à deformação permanente. Ainda assim, nos primeiros anos em que o pavimento se encontra em serviço apresenta uma tendência natural para reduzir a porosidade, aparecendo as referidas deformações na zona que limita a área de contacto entre o pneu e o pavimento.

As rodeiras formam-se devido às deformações permanentes que ocorrem nas diferentes camadas que constituem o pavimento, solo de fundação, camadas granulares e camadas betuminosas, a Figura 4.4 apresenta as diferentes causas de formação de rodeiras.

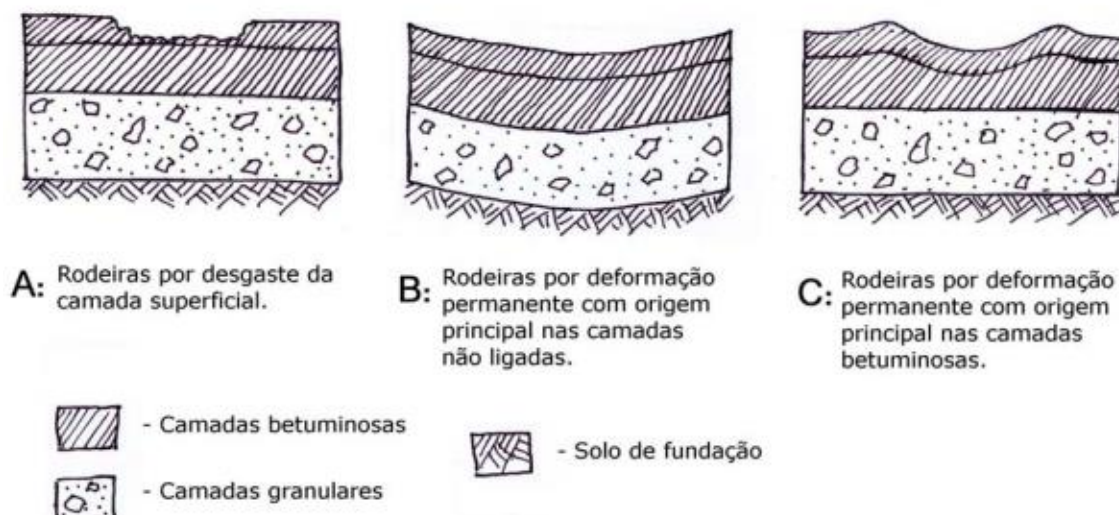


Figura 4.4 - Esquematização das diferentes causas de formação de rodeiras  
(adaptado de NCHRP, 2002 citado por Gardete, 2006)

No caso A, as rodeiras ocorrem devido à degradação da camada superficial do pavimento, contribuindo apenas esta camada para a sua formação. Este desgaste é originado principalmente pela utilização de correntes de neve ou pneus de gelo com pregos, pelo que, a sua ocorrência se restringe a países com clima mais frio.

No caso B, as rodeiras são causadas pela deformação do solo de fundação (podendo existir a contribuição de outras camadas granulares). Apesar da deformação do pavimento se dever essencialmente ao solo de fundação, as restantes camadas mantêm a sua espessura, dado que estas se vão deformar para acompanhar o movimento da fundação. Estas rodeiras são caracterizadas por terem grande raio.

No caso C, 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.

A deformação permanente verificada numa camada betuminosa é o somatório de duas componentes. A compactação (densificação) da camada provoca uma diminuição de vazios e um correspondente assentamento à superfície (SHRP 1994, citado por Barrão, 2011).

### **4.3.2 Fatores que causam a deformação permanente**

Há diversos fatores que influenciam a deformação permanente em camadas betuminosas. A seguir descrevem-se algumas causas que provocam a deformação permanente.

#### **- Mau dimensionamento de projeto**

A deformação permanente estrutural na maioria das vezes é decorrente de mau dimensionamento das camadas do pavimento, inadequada drenagem, falta de suporte do solo e compactação insuficiente (um maior esforço de compactação leva a um maior contacto entre as partículas do agregado ficando estas orientadas de forma a serem mais resistentes).

#### **- Tráfego**

O aumento do tráfego diariamente (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 da intensificação

de formação dos cavados de rodovia, devido à deformação permanente em misturas betuminosas (COST 334, 1999 citado por Gardete, 2006).

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 4.5 apresenta-se a distribuição prevista do transporte de cargas por diferentes modos de transporte para os estados membros da UE desde 1990 até 2030. Observa-se que o transporte de mercadorias em pavimentos rodoviários assumirá uma importância crescente, prevendo-se que em 2030 represente 77,4% do transporte de mercadorias (DG TREN, 2003 citado por Gardete, 2006).

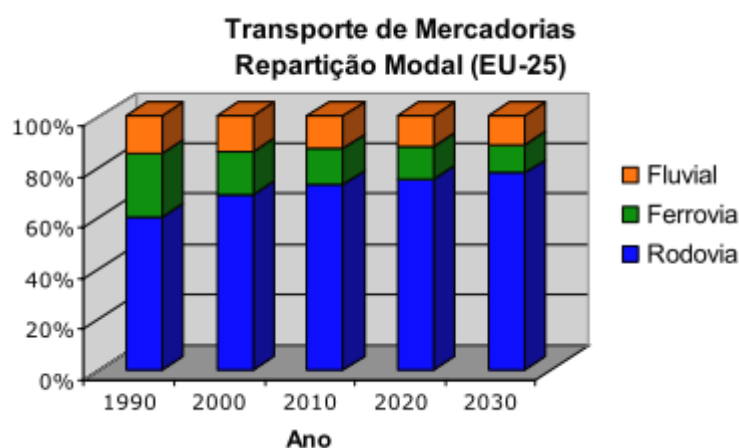


Figura 4.5 - Evolução da repartição modal do transporte de mercadorias na UE, previsão até 2030 (DG TREN, 2003 citado por Gardete, 2006)

Analisando a Figura 4.5, verifica-se um crescimento gradativo de tráfego pesado, o que implica que os pavimentos tenham de possuir cada vez mais características resistentes ao tráfego, para fazer face ao aumento de cargas a que vai estar sujeito.

A velocidade de tráfego também é um fator condicionante na resposta dos pavimentos, o que para velocidades mais baixas a resposta do pavimento é menos rígida, dado que a carga permanece durante mais tempo na mesma zona.

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 citado por Gardete, 2006).

#### - Temperatura

A temperatura é um fator preponderante no comportamento do pavimento, influenciando a viscosidade do betume. O aumento da temperatura implica que o betume fique mais fluido diminuindo a resistência à deformação permanente das misturas betuminosas. Assim, para um determinado carregamento, o aumento da temperatura influencia o comportamento estrutural do pavimento, originando deformações permanentes.

Nos materiais viscoelásticos, a temperatura é predominante no comportamento do material durante os períodos de solitação. Para as misturas betuminosas, o clima da região onde são realizadas as obras de pavimentação exerce enorme influência no seu comportamento mecânico.

Deste modo, é muito importante definir com rigor o tráfego e a temperatura associadas ao pavimento para melhorar os resultados obtidos, associados à viabilidade da mistura betuminosa. A Figura 4.6 representa as zonas do país em função da temperatura.

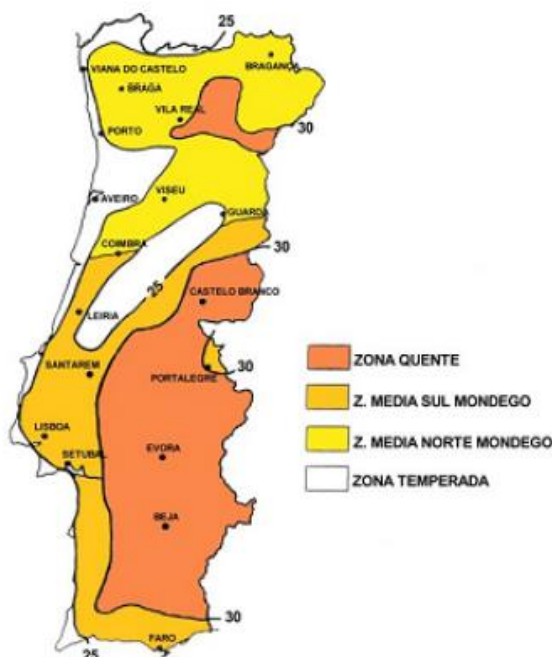


Figura 4.6 - Zonas climáticas de Portugal Continental (Baptista, 1999, citado por Dinis-Almeida, 2010)

As temperaturas indicadas no Quadro 4.2 são as 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

Quadro 4.2 - Temperaturas para avaliação da resistência à deformação permanente em Portugal Continental (Freire, 2002, citado por Dinis-Almeida, 2010)

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

#### - Betume

O excesso de ligante funciona como um lubrificante facilitando o movimento entre as partículas, desta forma verifica-se menos resistência à deformação permanente.

O betume vai envelhecendo com a passagem do tempo, por volatilização e oxidação dos seus componentes, este envelhecimento prejudica algumas características das misturas betuminosas, no entanto 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 (Gardete, 2006).

#### **- Agregados**

As misturas constituídas por agregados com granulometria contínua obtêm maior contacto entre as partículas e aumentam a resistência da mistura ao corte melhorando o comportamento à deformação permanente.

#### **- Compactação**

A compactação diminui o volume de vazios na mistura. Se o volume de vazios for elevado, o pavimento quando solicitado irá densificar a mistura, originando deformações. A falta de contacto entre as partículas, compromete a estabilidade a mistura, visto que quando carregadas as partículas movem-se da posição original provocando deformações à superfície.

Através de uma adequada compactação o volume de vazios na mistura diminui provocando um aumento do atrito entre as partículas e criando uma melhor ligação entre os agregados e o betume. Assim, quando sujeita à ação do tráfego, a mistura betuminosa terá melhor comportamento à deformação permanente. Quando a porosidade é muito elevada, sob a ação do tráfego, a mistura densifica-se e o atrito entre as partículas diminui, originando deformações (Gardete, 2006).

O método de compactação adotado em laboratório deve reproduzir as condições verificadas *in situ*. Em laboratório existem diversos processos de compactação dos provetes, nomeadamente a compactação por impacto, a compactação estática, e ainda a compactação por compactador de rolo. O tipo de compactação utilizado afeta as propriedades físicas das misturas de forma diferente. Este fator é importante, se forem efetuadas comparações entre resultados obtidos com diferentes métodos de compactação (Gardete, 2006).

### **4.3.3 Consequências da deformação permanente**

A formação de rodeiras por deformação permanente tem várias consequências, diminui a segurança em períodos com maior precipitação, pois dificulta a drenagem transversal. A acumulação de água nas rodeiras agrava os fenómenos de hidroplanagem. Em países com

invernos rigorosos onde haja ocorrência de formação de gelo a situação é mais gravosa, já em tempo seco a existência de rodeiras no pavimento torna a condução difícil e imprecisa, sendo diminuída a qualidade de serviço da via, comprometendo a sua comodidade e segurança.

#### **4.3.4 Ensaios laboratoriais para caracterizar a resistência à deformação permanente**

Segundo Freire (2002), existem vários ensaios laboratoriais para caracterizar a resposta dos materiais betuminosos do ponto de vista da deformação permanente, sendo divididos em três grupos principais: os ensaios “empíricos”, os ensaios “fundamentais” e os ensaios de “simulação”.

É fundamental conseguir avaliar a suscetibilidade das misturas betuminosas à deformação permanente. Nesta linha de pensamento foram aparecendo vários ensaios para esse fim, como sejam, o ensaio de compressão uniaxial cíclico, o ensaio de compressão triaxial cíclico, o ensaio de corte a altura constante e os ensaios de simulação de tráfego em laboratório (Gardete, 2006). A seguir faz-se uma breve descrição dos ensaios mais utilizados.

##### **4.3.4.1 Ensaios empíricos**

No grupo dos ensaios “empíricos” os mais frequentes são o ensaio Marshall e o ensaio Hveem.

O ensaio Marshall realiza-se de acordo com a norma EN 12697-34 (*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 34: Marshall test*) e o ensaio Hveem de acordo com a norma ASTM D 1560 (*Standard Test Methods for Resistance to Deformation and Cohesion of Bituminous Mixtures by Means of Hveem Apparatus*).

O principal objetivo do ensaio Marshall é quantificar a resistência mecânica e a deformação sofrida por uma mistura betuminosa, compactada em laboratório, sob determinadas condições. No ensaio Hveem o objetivo é avaliar os resultados obtidos ao longo de vários anos e verificar a sua analogia com comportamentos observados em pavimentos reais.

##### **4.3.4.2 Ensaios fundamentais**

###### **- Ensaios de compressão uniaxial e triaxial**

Os ensaios de compressão uniaxial e compressão triaxial podem ser realizados com a aplicação de cargas estáticas ou repetidas. Os ensaios estão descritos na norma EN 12697-25, *Bituminous mixtures - Test Methods for Hot Mix Asphalt - Part 25: Cyclic Compression*

*test e os ensaios de corte descritos na norma AASHTO TP7-94 (Standard test method for determining the permanent deformation and fatigue cracking characteristics of hot mix asphalt (HMA) using the simple shear test (SST) device).*

O ensaio de compressão uniaxial estático tem vindo a ser adotado e implementado em todo o mundo, dada a sua simplicidade na preparação dos provetes e facilidade de execução, através da utilização de equipamento de ensaio pouco complexos e de baixo custo. Os provetes habitualmente de forma cilíndrica, são submetidos a uma carga e temperatura constantes durante um determinado intervalo de tempo, gerando um estado de compressão simples. Embora este ensaio não seja o mais adequado para a simulação laboratorial dos efeitos da densificação e das deformações provocadas pelo tráfego, permite avaliar as várias propriedades das misturas betuminosas. Os ensaios de compressão uniaxial com aplicação de cargas repetidas são mais adequados do que os estáticos, do ponto de vista da avaliação das deformações permanentes. Este tipo de ensaios consiste na aplicação repetida de ciclos de carga e de descarga sobre o provete, medindo-se as extensões verticais resultantes. 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 a tensão aplicada ao longo do tempo (Freire, 2002 citado por Dinis-Almeida, 2010).

O ensaio de compressão triaxial permite aproximar as condições de tensão de ensaio às que a mistura betuminosa está sujeita na realidade. Neste tipo de ensaios é possível aplicar ao provete uma tensão de confinamento, à semelhança do que se verifica num pavimento e que o ensaio de compressão uniaxial não permite simular satisfatoriamente. Estes ensaios são semelhantes aos ensaios de compressão uniaxial, mas os provetes são submetidos a uma tensão de confinamento estática durante o ensaio. Desta forma é possível realizar ensaios triaxiais estáticos ou cíclicos. O carregamento axial é usualmente de forma retangular ou sinusoidal. 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 (Gardete, 2006).

#### **4.3.4.3 Ensaios de corte**

A passagem dos veículos num pavimento causa tensões de compressão e tensões de corte nos pavimentos, estando diretamente relacionadas com as deformações permanentes que ocorrem nas misturas betuminosas. Os ensaios de corte foram muito divulgados nos EUA para que os ensaios de caracterização permanente tivessem como base a aplicação de tensões de

corde. Na Europa não é muito utilizado, não existindo nenhuma norma europeia para a sua realização.

A norma AASHTO TP7-01 descreve vários ensaios de corte, o ensaio de corte com varrimento de frequência a altura constante, o ensaio de corte simples a altura constante e o ensaio de corte cíclico a altura constante, sendo este último o mais utilizado para analisar o comportamento das misturas à deformação permanente (Freire, 2002 citado por Dinis-Almeida, 2010).

#### 4.3.4.4 Ensaios de simulação em pista de laboratório

Os ensaios de simulação distribuem-se em dois grupos, os ensaios de simulação em pista de laboratório e os ensaios de simulação em pista real.

##### - Ensaios de simulação em pista de laboratório

Os ensaios de simulação em pista de laboratório (*wheel tracking tests*) têm como objetivo representar as ações do tráfego através de passagens sucessivas de um rodado, para avaliação do comportamento à deformação permanente de misturas betuminosas. Este ensaio consiste em submeter um provete (em forma de lajeta), num equipamento de ensaio adequado, a sucessivas passagens de uma roda, registando a deformação vertical máxima que a lajeta tenha sofrido. Os resultados obtidos dependem do número de passagens, da velocidade da roda, da pressão de contacto, da temperatura de ensaio e da espessura da lajeta.

A Norma Europeia EN 12697-22: 2003 (*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 22: Wheel tracking*) considera a utilização de dois tipos de equipamentos, o equipamento de grandes dimensões (designado por “*large-size device*”) e o equipamento de pequenas dimensões (designado por “*small-size device*”) sendo especificados cinco modalidades distintas, sintetizadas no seguinte quadro.

Quadro 4.3 - Tipos de ensaios de simulação em pista de laboratório previstos na norma EN 12697-22: 2003 (Batista, 2004 citado por Dinis-Almeida, 2010)

Tipo de Equipamento	Grandes Dimensões	Dimensões Extra-Grandes	Pequenas Dimensões		
			Provetes Prismáticos	Provetes Cilíndricos	
				Ao ar	Em banho de água
Dimensões dos provetes	500x180x50*mm <sup>3</sup> ou 500x180x100*mm <sup>3</sup>	700x500x60*	≥260x300xe**	200 a 300 mm de diâmetro dependendo da dimensão da mesa; e espessura e**	
Largura do rasto da roda	80 ± 5mm	110 ± 5mm	w ± 1 mm com w = 50 ± 5 mm		
Pressão do pneu	600 ± 30 Kpa	600 ± 30 Kpa	n.a. (borracha maciça com espessura de 20 ± 2 mm)		
Curso da roda no provete	410 ± 5 mm	700 ± 5 mm	230 ± 10 mm		
Carga aplicada	5000 ± 50 N	10 000 ± 100 N	$70 \cdot \frac{w}{50} \pm 10 N$		
Frequência de carregamento (ida e volta)	1,0 ± 0,1 Hz	2,5 ± 0,5 Hz	25 ± 1,0 ciclos/60 s		

\*Salvo outras indicações, que podem depender da máxima dimensão do agregado, da espessura da camada;

\*\* Espessura nominal em função da espessura da camada e/ou da dimensão máxima do agregado;

Dentro do equipamento de pequenas dimensões distinguem-se ainda dois procedimentos distintos (procedimento A e B), estes distinguem-se 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. Cada ciclo corresponde a duas passagens da roda, ida e volta.

O Quadro 4.4 apresenta o número de provetes necessários à realização do ensaio de acordo com o equipamento.

Quadro 4.4 - Número de provetes de acordo com o tipo de equipamento  
(Fonte: Norma EN 12697-22:2003)

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

Na Figura 4.7 apresenta-se o equipamento *Wheel Tracking*, de pequenas dimensões, instalado nos laboratórios do Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura da UBI (DECA-UBI), que permite a execução de ensaios através da norma europeia EN 12697-22: 2003, pelo procedimento B.

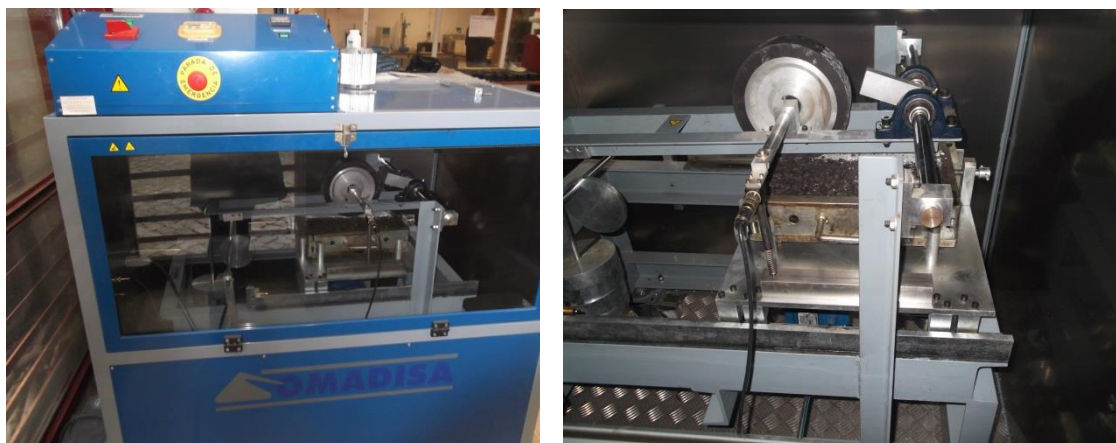


Figura 4.7 - Equipamento *Wheel Tracking* (DECA-UBI)

#### - Ensaios de simulação em pista à escala real

Os ensaios de simulação em pista à escala real, existem em alguns países e foram desenvolvidos para avaliar o desempenho dos pavimentos, assim como as degradações associadas à passagem do tráfego. Estes permitem avaliar as propriedades mecânicas dos materiais aplicados e a respetiva evolução ao longo do tempo, uma vez que os processos adotados na construção dos pavimentos e as ações aplicadas são semelhantes às verificadas nos pavimentos em serviço. Este tipo de ensaio tem como vantagens a obtenção de resultados num intervalo de tempo substancialmente reduzido, quando comparado com a situação real observada nos pavimentos em serviço. Relativamente às desvantagens, pode referir-se o

elevado custo e a manutenção dos equipamentos. Além disso, neste tipo de ensaios é avaliada a capacidade da estrutura de suporte do pavimento, não se podendo intervir nos aspetos que condicionam a degradação destes, como por exemplo, os efeitos do envelhecimento dos materiais (Dinis-Almeida, 2010).

## 4.4 Caracterização da sensibilidade à água

A degradação das misturas betuminosas devido à presença de água ocorre em várias formas e graus de severidade, sendo a perda de adesividade a consequência primária. Esta perda de adesividade ocorre em sítios localizados do pavimento, no qual o betume (que se separou dos agregados) migra até à superfície das camadas betuminosas. Esta migração pode levar a deformações permanentes na forma de rodeiras ou abatimentos, ao desenvolvimento de desagregações na camada de desgaste e ao fendilhamento sob a ação repetida das cargas dos veículos. A intrusão de água nestas zonas fendilhadas e a ocorrência de carregamento repetido do tráfego, contribui para intensificar a degradação da camada de desgaste, e provavelmente, das camadas subjacentes. Outra consequência da presença de água nas misturas betuminosas é a redução da sua rigidez. Um pavimento com falta de rigidez, sob a ação do tráfego, está mais sujeito ao aparecimento de degradações (Silva, 2005 citado por Torres, 2010).

A sensibilidade à água é determinada 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*). A norma descreve um método de ensaio para determinar o efeito de saturação e o condicionamento sobre a resistência à tração de provetes cilíndricos. No final deste procedimento, todos os provetes são submetidos ao ensaio para determinar o índice de tração indireta (ITSR - *Indirect Tensile Strength Ratio*) a uma temperatura de ensaio entre 5 °C e 25 °C. De acordo com a norma EN 13108-20: 2006 (*Bituminous mixtures - Material specifications Parte 20: Type testing*) a temperatura recomendada é de 15 °C.

O Caderno de Encargos das Estradas de Portugal, S.A. não define parâmetros mínimos para os valores de sensibilidade à água para camadas base ou regularização. De acordo com as especificações espanholas, Art. 542, PG-3, estas indicam que os valores de resistência conservada em tração indireta (ITSR) têm de ser igual ou superior a 80% para serem resistentes à entrada de água apresentarem um bom comportamento.

## CAPITULO 5 - Estudo experimental

### 5.1 Introdução

Neste capítulo apresenta-se a metodologia de formulação que permite determinar a composição base das misturas betuminosas recicladas temperadas produzidas no âmbito deste presente estudo, assim como as propriedades gerais e os respetivos ensaios. As misturas betuminosas recicladas temperadas produzidas visam a sua aplicação numa camada base.

Os materiais utilizados na produção das misturas betuminosas recicladas temperadas cumprem determinados requisitos, sendo análogos às misturas betuminosas recicladas a quente. Os critérios de exigência estão referenciados no caderno de Encargos das Estradas de Portugal (CE EP, 2012) e em especificações normalizadas (EN).

Inicialmente caracterizaram-se os diferentes materiais utilizados na mistura betuminosa reciclada temperada e na mistura betuminosa a quente (mistura de referência), descrevendo-se o método de formulação adotado.

Para o fabrico das misturas efetuou-se uma formulação granulométrica para várias composições de acordo com o fuso selecionado, AC20 BASE (MB). Deste modo, definiram-se cinco misturas para este estudo, quatro misturas com percentagens diferentes de material fresado com emulsão betuminosa e uma mistura de referência (mistura betuminosa a quente com betume). Os materiais fresados utilizados neste estudo são provenientes da estrada nacional EN 346 entre Alcaria e Capinha e de um troço da A23 próximo de Castelo Branco. No final obtiveram-se cerca de 12 misturas temperadas diferentes e uma mistura a quente, para cada mistura produziu-se em laboratório cerca de três provetes, completando no final 39 provetes para serem submetidos ao ensaio de módulo de tração à compressão diametral.

O material fresado e os agregados para a mistura betuminosa foram pré-aquecidos na estufa a  $110\pm 5$  °C e a emulsão foi adicionada à temperatura ambiente, para a mistura a quente os agregados e o betume foram submetidos à temperatura de  $150\pm 5$  °C.

A compactação dos provetes cilíndricos (ensaio de sensibilidade à água e módulo de rigidez em compressão diametral), realizou-se de acordo com a norma EN 12697-30:2004, *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 30: Specimen preparation by impact compactor*. Utilizou-se ainda o cilindro de rolos (ensaio da fadiga) e a placa vibratória (*Wheel tracking*).

A cura foi realizada em condições variadas, para o ensaio de tração em compressão diametral, os provetes foram mantidos à temperatura ambiente, tendo sido realizado o

ensaio ao 1º, 7º, 14º, 21º e 28º dia, para a realização do ensaio de fadiga e ensaio de *wheel tracking* a cura foi de um mês à temperatura ambiente.

Após o ensaio de rigidez à tração em compressão diametral, analisaram-se e os valores, e selecionou-se a quantidade de emulsão mais vantajosa a nível da qualidade serviço.

Por fim, descrevem-se o trabalho experimental referente aos ensaios de desempenho, assim como, as condições de ensaio, os equipamentos utilizados, indicando as características gerais e comparando com outros autores.

Ao longo do trabalho laboratorial teve-se em consideração alguns cuidados na preparação, produção e compactação dos provetes, de forma a reproduzir as condições que se verificam durante a execução do pavimento.

Os ensaios laboratoriais realizaram-se nos laboratórios do Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura da Universidade da Beira Interior.

## **5.2 Metodologia de formulação das misturas betuminosas**

### **5.2.1 Considerações gerais**

As primeiras metodologias de formulação de misturas betuminosas foram desenvolvidas após a segunda guerra mundial e foram baseadas em métodos empíricos. Estas metodologias difundiram-se por todo o mundo e ainda são utilizadas na maior parte dos países nos dias de hoje (Dinis-Almeida, 2010).

No entanto, nas duas últimas décadas, a investigação no domínio da formulação de misturas betuminosas tem sido direcionada para o desenvolvimento de novos métodos que incorporam critérios baseados no conhecimento das propriedades fundamentais das misturas betuminosas, nomeadamente, o módulo de rigidez, a resistência à fadiga e a resistência à deformação permanente (Picado-Santos, 2005).

A formulação de uma mistura betuminosa consiste na seleção e determinação das quantidades dos seus constituintes, tendo como objetivos garantir o cumprimento de determinadas exigências, e encontrar um material económico que garanta um desempenho ótimo em serviço. Às misturas betuminosas são exigidas características como a estabilidade, a durabilidade, a flexibilidade, a resistência à fadiga, aderência, impermeabilidade e trabalhabilidade (Branco *et al.*, 2008)

Para que as misturas cumpram adequadamente a sua função, é essencial que se assegure uma boa qualidade ao nível do seu fabrico. A formulação das misturas em laboratório é

fundamental na medida em que a metodologia selecionada condicionará as características mecânicas da mistura (Barrão, 2011).

Quanto mais representativos das condições *in situ* forem os métodos utilizados, mais próximo estará o estudo laboratorial da realidade, podendo desta forma, definir uma mistura que apresente um bom comportamento em serviço, sob a ação do tráfego e dos agentes atmosféricos (Dinis-Almeida, 2010).

As misturas betuminosas contêm essencialmente três componentes: agregados, ligante e vazios. Na reciclagem de misturas betuminosas os componentes principais são: material fresado, ligante betuminoso novo e caso seja necessário, agregados novos com o objetivo de corrigir as granulometrias.

Em geral, os métodos de formulação utilizados para misturas a quente podem adaptar-se às misturas betuminosas recicladas a quente (neste caso misturas betuminosas recicladas temperadas) uma vez as segundas diferem das primeiras apenas na sua composição. Além dos agregados e do betume são constituídas por misturas betuminosas recuperadas (agregados e betume envelhecido) (Aravind e Das, 2006 citado por Dinis-Almeida, 2010).

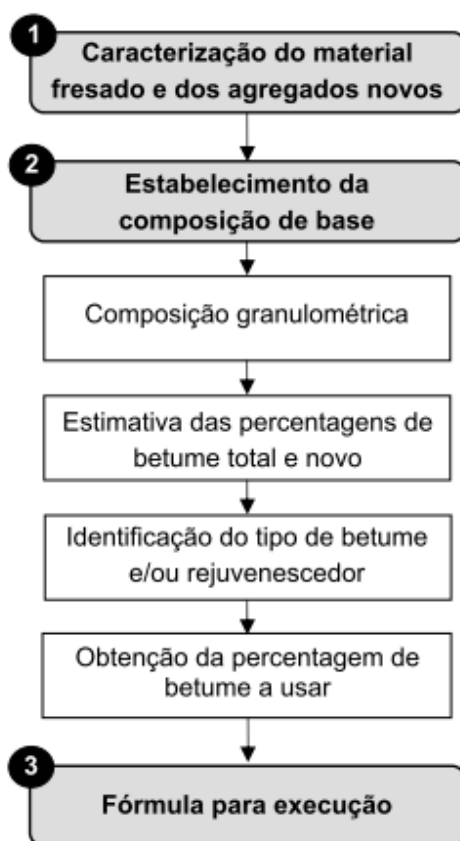


Figura 5.1 - Organograma da metodologia geral de formulação de misturas betuminosas recicladas a quente (Baptista, 2006)

O processo geral de formulação (Figura 5.1) das misturas betuminosas pode resumir-se aos seguintes passos fundamentais: caracterização dos materiais, estabelecimento da composição base e escolha da fórmula para execução, sendo que no caso de misturas betuminosas recicladas, além das características dos materiais novos avaliam-se também as propriedades do material fresado (Baptista, 2006).

Dinis-Almeida (2010) concluiu no seu estudo, que o ensaio mais vantajoso para ser usado como método base na metodologia de formulação foi o ensaio de módulo de rigidez à tração por compressão diametral, visto que apresentou resultados mais coerentes e com menos variabilidade. A metodologia de formulação adotada no âmbito deste estudo apresenta-se na Figura 5.2.

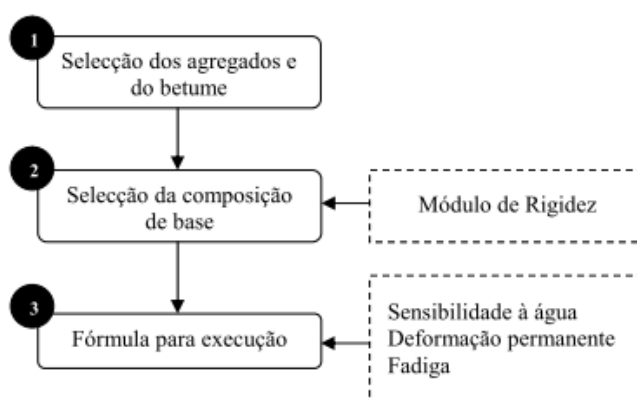


Figura 5.2 - Organograma da metodologia de formulação (proposta por Dinis-Almeida, 2010)

A primeira fase do método proposto consiste na verificação das exigências granulométricas da mistura betuminosa e da necessidade, ou não, de adicionar agregado natural. Posteriormente determinou-se o teor de betume envelhecido do material fresado e estimou-se a percentagem de betume novo a adicionar à mistura. Depois produzem-se diferentes misturas betuminosas com diferentes teores de emulsão (2%, 3% e 4%) e realiza-se o ensaio de módulo de rigidez para a seleção do teor ótimo de emulsão. A metodologia de formulação prevê a utilização de ensaios de desempenho (resistência à fadiga, deformação permanente e sensibilidade à água) para confirmar a fórmula de execução da mistura.

Quadro 5.1 - Limites do fuso AC20 Base (MB)

<b>Peneiros Série Base + Série 2</b>	<b>% Acumulada de material passado</b>
31.5 mm	100
20.0 mm	90-100
12.5 mm	57-86
4.0 mm	34-49
2.0 mm	26-41
0,5 mm	12-26
0,125 mm	4-14
0,063	2-7

No âmbito deste estudo foram analisadas quatro misturas betuminosas temperadas com diferentes quantidades dos seus constituintes e uma mistura betuminosa a quente (mistura de referência), de forma a avaliar as características das misturas betuminosas recicladas temperadas e a comparar com as misturas betuminosas convencionais (mistura betuminosa a quente), muito aplicadas na pavimentação de estradas em Portugal.

## 5.2.2 Caracterização dos materiais utilizados

Neste subcapítulo apresenta-se a caracterização dos materiais novos (agregados e ligantes) introduzidos nas misturas betuminosas, assim como a caracterização do material fresado, a estimativa do teor de betume envelhecido e a determinação do ligante novo a adicionar às misturas betuminosas recicladas temperadas.

### 5.2.2.1 Caracterização dos materiais novos

#### - Agregados naturais

Os agregados adicionados às misturas betuminosas devem possuir determinadas características físicas, químicas, geométricas e mecânicas, favoráveis a um bom comportamento das misturas durante a fase de construção do pavimento e um bom desempenho em serviço.

A granulometria influencia todas as características de comportamento da mistura betuminosa, verificando-se que na prática, uma mistura adequada de elementos finos, médios e grossos, com uma densidade elevada, é aquela que permite obter melhores características (Lopes, 2009).

Os ensaios de caracterização dos agregados foram efetuados de acordo com as normas europeias vigentes, tendo sido determinada a granulometria das partículas, a massa volúmica, a absorção de água e a resistência ao desgaste. Os pontos seguintes descrevem de uma forma sucinta, os ensaios e os resultados obtidos.

Os agregados novos utilizados (agregados naturais) resumem-se a pó de pedra e duas britas proveniente da empresa J. Bartolomeu, Lda. com a seguinte classificação da central de britagem: brita 6/15 e brita 15/25. Estes materiais foram os componentes essenciais da mistura de referência (mistura betuminosa a quente). Na Figura 5.3 pode observar-se uma amostra dos agregados incorporados nas misturas.



Figura 5.3 - Agregados

#### - Análise granulométrica

Os agregados foram submetidos ao processo de peneiração de acordo com a NP EN 933 - 1: 2000 (Ensaio das propriedades geométricas dos agregados - Parte1: Análise granulométrica - Método de peneiração). Este ensaio consiste na separação de um material, por meio de um conjunto de peneiros, dispostos em ordem decrescente de abertura de malha, em diversas frações granulométricas.

Os agregados secaram-se em estufa a uma temperatura entre os  $110 \pm 5$  °C, durante 24 horas. Os peneiros foram pesados previamente numa balança eletrónica e depois colocados por

ordem decrescente no agitador mecânico e submetidos a vibração durante 5 minutos. Concluída a peneiração, pesou-se o material retido em cada peneiro. No Quadro 5.2 e Figura 5.4 apresentam-se os resultados obtidos das pesagens para os diferentes agregados.

Quadro 5.2 - Análise granulométrica dos agregados novos incorporados nas misturas

Abertura dos peneiros (mm)	% Acumulada do material passado		
	Pó de pedra	Brita 15/25	Brita 6/15
31,5	100	100	100
25,0	100	97,2	100,0
19,0	100	69,6	99,6
12,5	99,9	12,3	38,7
4,0	77,7	0,1	0,2
2,0	54,8	0,1	0,1
0,5	27,3	0,1	0,1
0,125	5,9	0,0	0,1
0,063	1,8	0,0	0,0

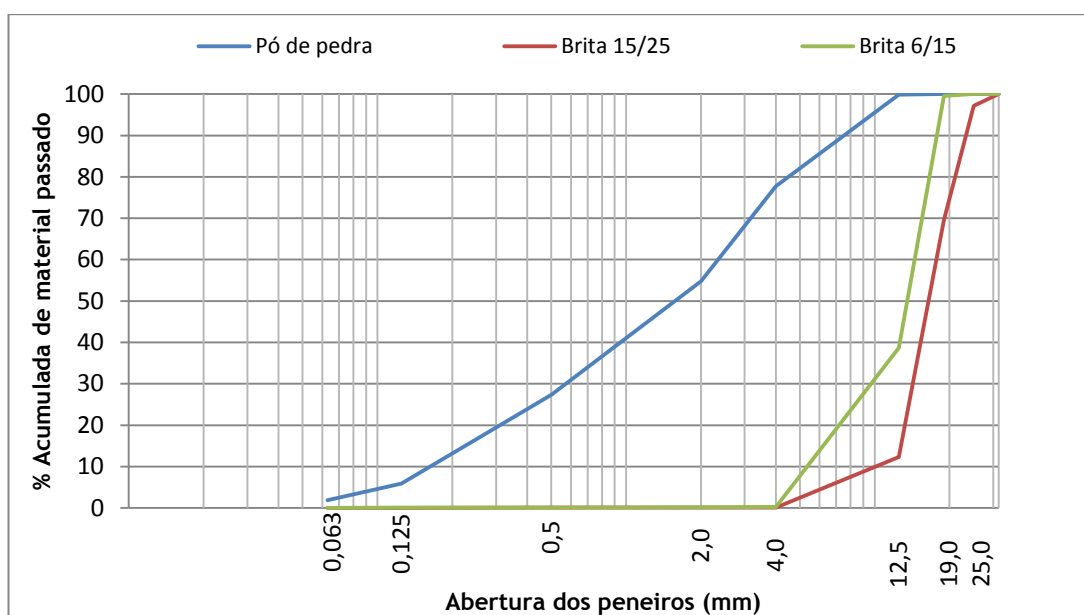


Figura 5.4 - Curvas granulométricas dos agregados incorporados nas misturas

**- Determinação da massa volúmica e da absorção de água**

A massa volúmica e a absorção de água das britas 6/15 e 15/25 determinaram-se de acordo com a norma NP EN 1097-6: 2003 (Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados - Parte 6: Determinação da massa volúmica e da absorção de água).

Os métodos principais para determinar a massa volúmica são: o método do cesto de rede metálica para agregados que passam pelo peneiro 63 mm e são retidos no peneiro 31,5 mm e o método do picnómetro para agregados que passam pelo peneiro de 31,5 mm e são retidos no peneiro de 0,063 mm. O método do cesto de rede metálica aplicou-se às britas e o segundo método ao pó de pedra. O cálculo da massa volúmica ( $\delta$ ) é dado pela expressão 5.1:

$$\delta = \frac{M_1}{M_1 + M_3 - M_2} \times \rho_w \quad (5.1)$$

Onde:

$\delta$  - Massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca ( $\text{kg/m}^3$ );

$M_1$  - Massa do agregado saturado com superfície seca (g);

$M_2$  - Massa do cesto de rede metálica vazio (g);

$M_3$  - Massa do agregado imerso em água dentro do cesto de rede metálica (g);

$\rho_w$  - Massa volúmica da água à temperatura de ensaio ( $\text{kg/m}^3$ ).

Para determinar a absorção de água, o agregado foi transferido para um tabuleiro e colocou-se na estufa a uma temperatura de aproximadamente 115 °C, a secar até massa constante, registou-se o valor e procedeu-se ao cálculo da absorção de água dado pela expressão 5.2:

$$A = \frac{M_1 - M_4}{M_4} \times 100 \quad (5.2)$$

Onde:

A - absorção de água (em percentagem de massa seca) após imersão de 24 horas (%);

$M_1$  - massa do agregado saturado com superfície seca ao ar (g);

$M_4$  - massa do agregado seco em estufa (g).

Os resultados obtidos apresentam-se no Quadro 5.3:

Quadro 5.3 - Massa volúmica e absorção de água dos agregados novos

Agregado	Massa Volúmica, $\delta$ (kg/m <sup>3</sup> )	Absorção de água por imersão, $A$ (%)
Brita 6/15	2690	0,2
Brita 15/25	2690	0,2
Pó de Pedra	2640	3,29
CE EP (2012)	-	Máx. 2,0

O Caderno de Encargos das Estradas de Portugal (CE EP, 2012) estabelece um valor máximo de 2% para absorção de água, pelo que o resultado obtido para as britas é inferior, enquanto os resultados obtidos para o pó de pedra ultrapassam este valor.

#### - Desgaste na máquina de Los Angeles

O ensaio de Los Angeles aplica-se para determinar a resistência mecânica dos agregados grossos ao desgaste/fragmentação (perda da rugosidade superficial).

A resistência à fragmentação é determinada em conformidade com a NP EN 1097-2: 2000 (Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados - Parte 2: Método de determinação da resistência à fragmentação). Os agregados submetidos ao ensaio foram as britas 6/15 e 15/25.

O cálculo do coeficiente de Los Angeles é descrito na expressão 5.3:

$$LA = \frac{5000 - m}{50} \quad (5.3)$$

Onde:

$m$  - Massa retida em gramas, no peneiro com uma malha de 1,6 mm.

O resultado referente ao ensaio de Los Angeles para a brita 6/15 e 15/25 apresenta-se no Quadro 5.4.

Quadro 5.4 - Coeficiente do ensaio de *Los Angeles*

Coeficiente de <i>Los Angeles</i> , $LA$ (%)	
Brita 6/15	24
Brita 15/25	20
CE EP (2012)	Máx. 40

O Caderno de Encargos das Estradas de Portugal (CE EP, 2012) estabelece um valor máximo de 40% para o coeficiente de *Los Angeles*, pelo que o resultado obtido para as britas é inferior.

**- Ligantes betuminosos**

A emulsão betuminosa utilizada nas misturas betuminosas temperadas foi a RECIEMUL 90 (fabricada a partir de um betume aditivado com características adequadas para a aplicação a temperaturas entre os 100 °C e 120 °C) e na mistura betuminosa a quente foi o betume 35/50, ambos fornecidos pela CEPESA Portuguesa Petróleos, S.A. O betume asfáltico 35/50 para pavimentação está de acordo com as especificações da EN 12591: 2009 (*Bitumen and bituminous binders - Specifications for paving grade bitumens*) e a emulsão betuminosa catiónica de rotura lenta de betume aditivado para a reciclagem temperada está de acordo com a norma EN 13808: 2005 (*Bitumen and bituminous binders - Framework for specifying cationic bituminous emulsions*).

Devido ao elevado teor de finos presentes no material fresado, o teor de betume presente na emulsão é o adequado para a sua viscosidade, permitindo a perfeita envolvência do material fresado. Por outro lado, o betume utilizado no seu fabrico tem uma composição e consistência adequada para regenerar o ligante envelhecido presente no material fresado. Esta é uma emulsão muito estável, garante um envolvimento sem escorrimentos, proporciona uma coesão inicial, adesividade ativa e passiva elevadas e uma trabalhabilidade que permite a aplicação com espalhadoras convencionais (CE EP, 2012). No entanto, nas misturas betuminosas a quente o ligante utilizado é betume.

No Quadro 5.5 e 5.6 apresenta-se as características da emulsão betuminosa RECIEMUL 90 e do betume 35/50, respetivamente.

Quadro 5.5 - Certificado de análise da emulsão betuminosa Reciemul 90 (Cepesa, 2012)

Características da emulsão betuminosa Reciemul 90			
Ensaio	Norma	Resultado	
Carga das partículas	EN1430	POSITIVA	
Conteúdo de ligante (por cont. água)	EN 1428	60,8%	
Peneiração	EN 1429	0,01 % m/m	
Viscosidade	EN 12846	37 s	
Resíduo de destilação	Penetração (25 °C, 100g, 5s), 10 <sup>-1</sup> mm	EN 1426	110

Quadro 5.6 - Certificado de análise do betume 35/50 (Cepssa, 2012)

Características do betume 35/50				
Ensaio	Norma	Resultado	Limites	Unidade
Penetração 25° C, 100gr, 5s	EN 1426	40	35-50	mm
Ponto de amolecimento	EN 1427	51,2	50-58	°C

### 5.2.2.2 Caracterização do material fresado

A progressiva utilização da reciclagem na produção de misturas betuminosas levou à necessidade de estabelecer especificações relativas às misturas betuminosas recuperadas.

As misturas betuminosas recuperadas incluem as misturas betuminosas provenientes da fresagem de camadas de pavimentos, e como tal, a norma NP EN 13108-8: 2011 (Misturas betuminosas - Especificações dos materiais - Parte 8: Misturas betuminosas recuperadas), estabelece requisitos para misturas betuminosas recuperadas no que respeita às propriedades do ligante e dos agregados, pois são relevantes para a qualidade da mistura final.

O material fresado utilizado na produção das misturas betuminosas proveniente de um troço da A23 (próximo de Castelo Branco) e da EN346 (Alcaria-Capinha).

Para a caracterização do material fresado recolheram-se diversas amostras de forma aleatória e representativa e armazenaram-se em barricas no laboratório da UBI.



Figura 5.5 - Pavimento do troço da EN346 em processo de fresagem

Posteriormente realizaram-se ensaios para a determinação da composição granulométrica, da percentagem de betume total envelhecido, entre outros.

### - Análise granulométrica

Após a extração do betume residual, os agregados foram submetidos ao processo de peneiração (tal como os agregados novos) de acordo com a NP EN 933 - 1: 2000 (Ensaio das propriedades geométricas dos agregados - Parte 1: Análise granulométrica - Método de peneiração).

No Quadro 5.7 e na Figura 5.6 apresenta-se a granulometria do material fresado proveniente da A23 e EN346 (após a extração de betume total envelhecido na mistura). Na Figura 5.6 apresenta-se a análise granulométrica do material fresado das duas amostras, tendo como referência o fuso granulométrico estabelecido no Caderno de Encargos das Estradas de Portugal, S.A., AC20 BASE (MB). Analisando a Figura 5.6 verifica-se que a curva granulométrica das duas amostras de material fresado são muito semelhantes, cumprindo quase na totalidade o fuso granulométrico preconizado no Caderno de Encargos das Estradas de Portugal, S.A. (CE EP, 2012) para misturas a quente, fuso AC 20 base (MB).

Quadro 5.7 - Análise granulométrica do material fresado

Abertura dos peneiros (mm)	Percentagem de passados (%)			
	Amostra EN 346	Amostra A 23	FUSO AC20BASE (MB)	
			Limite inferior	Limite superior
25	100	100	100	100
19	100	100	90	100
12,5	91	90	57	86
4	61	54	34	49
2	44	42	26	41
0,5	19	23	12	26
0,125	8	7	4	14
0,063	3	2	2	7

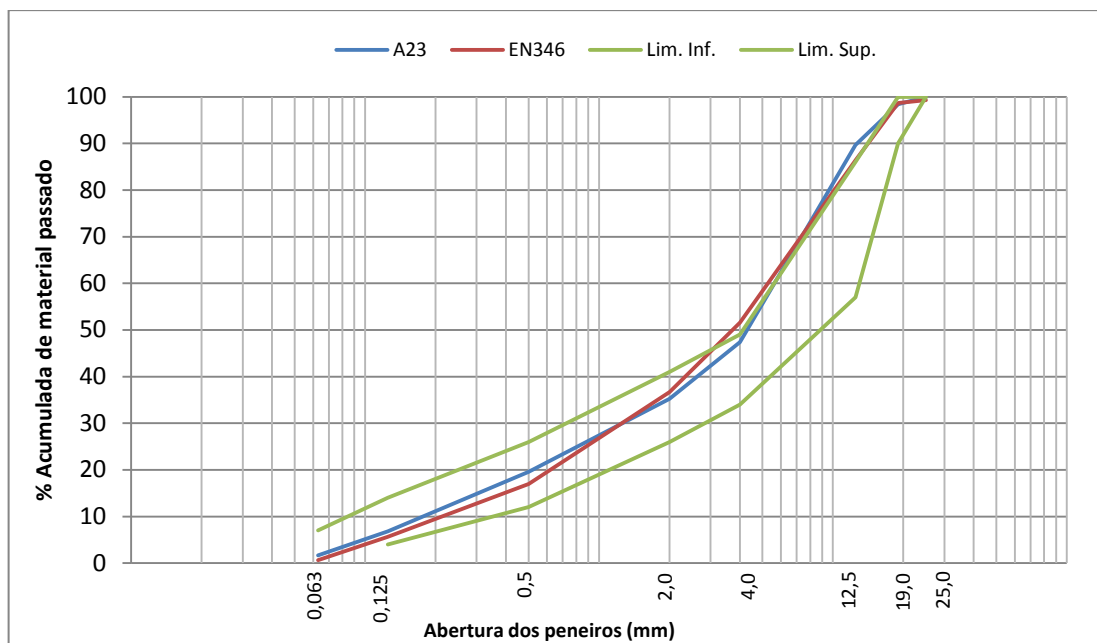


Figura 5.6 - Curvas granulométricas do material fresado e do fuso adotado

Ao analisar o material fresado proveniente da EN346 e da A23 verifica-se que ambos se encontram maioritariamente dentro dos limites do fuso adotado, embora se verifique um ligeiro desvio relativamente ao limite superior. Deste modo pode concluir-se que deverá ser adicionada uma pequena quantidade de agregado britado.

#### - Determinação da massa volúmica do agregado com superfície seca

A massa volúmica determinou-se de acordo com a norma NP EN 1097-6: 2003 (Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados - Parte 6: Determinação da massa volúmica e da absorção de água). Os resultados referentes à massa volúmica do material fresado apresentam-se no Quadro 5.8.

Quadro 5.8 - Massa volúmica do material fresado com superfície seca

Massa volúmica do agregado com superfície seca		
NP EN 1097-6: Método do picnómetro		
A 23	2660	(Kg/m <sup>3</sup> )
EN 346	2630	

### 5.2.3 Determinação do teor de betume envelhecido do material fresado

Foram realizados ensaios laboratoriais para determinação da quantidade de betume residual do material fresado (Figura 5.7). O ensaio realizou-se segundo o método de incineração em mufla de ignição em laboratório (DECA-UBI), de acordo com a EN 12697-39 (*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 39: Binder content by ignition*). A Figura 5.7 mostra o aspeto do material fresado antes e depois do ensaio. O Quadro 5.9 apresenta os resultados obtidos referentes à percentagem de massa perdida que representa o teor de ligante envelhecido presente nas misturas.

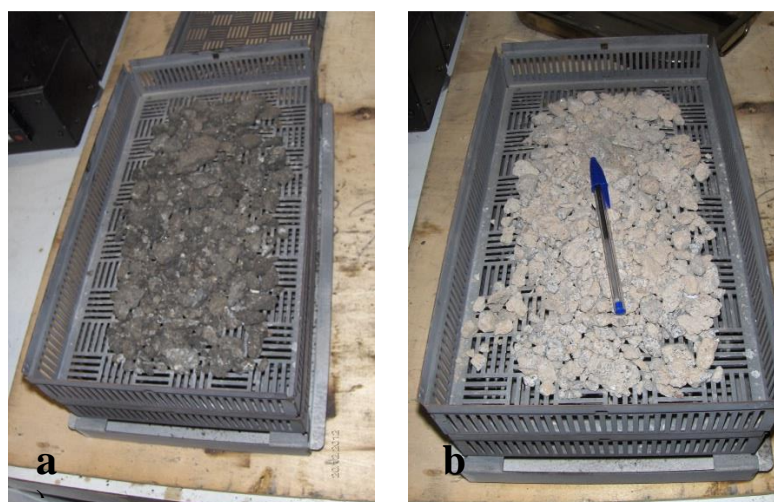


Figura 5.7 - Método de incineração em mufla  
(a) material fresado; (b) material após a extração do betume total

Quadro 5.9 - Teor do betume envelhecido do material fresado em laboratório (DECA - UBI)

Material fresado	% Média de massa perdida
A23	5,1
EN346	4,8

Duas propriedades muito importantes na caracterização do betume são a penetração e a temperatura de amolecimento pelo método de “anel e bola”. A penetração permite avaliar indiretamente a viscosidade, tornando possível estimar outras propriedades com base nesta (Branco *et al.*, 2008).

O Quadro 5.10 apresenta os valores médios obtidos em laboratório do material fresado proveniente do troço da A23 na Empresa Aurélio Martins Sobreiro & Filhos, S.A. O laboratório estudou criteriosamente várias amostras provenientes do material fresado determinando uma percentagem média de betume de 5,1%. O resultado obtido pelo laboratório da empresa é igual ao resultado obtido no laboratório (DECA-UBI) no âmbito deste estudo.

Quadro 5.10 - Caracterização do betume envelhecido da A23 (Empresa Aurélio Martins Sobreiro & Filhos, S.A.)

Ensaio	Média
Penetração (mm)	15,3
Anel e bola (°C)	62,3
Ligante extraído (%)	5,1

O Quadro 5.11 apresenta os valores médios obtidos em laboratório do material fresado proveniente do troço da EN346 na Empresa CEPISA - PROAS betumes. O laboratório considerou o teor de ligante normal para este tipo de material fresado. A penetração e o ponto de amolecimento indicam que o ligante está muito envelhecido. A percentagem média de betume é de 4,5%.

Quadro 5.11- Caracterização do betume envelhecido da EN346 (PROAS - Betumes CEPISA)

Ensaio	Média
Penetração (mm)	4
Ponto de amolecimento (°C)	85,7
Ligante extraído (%)	4,5

#### 5.2.4 Determinação da composição base das misturas betuminosas

Como já foi referido no capítulo 5.2.2.2, as amostras de material fresado cumprem em grande parte os limites do fuso granulométrico AC20 BASE (MB), verificando-se um pequeno desvio. Deste modo, optou-se por produzir misturas económicas, sem adição de material novo, com 100% material fresado e misturas com uma pequena percentagem de material granular novo, com o objetivo de corrigir a curva granulométrica. Foi também produzida uma mistura betuminosa a quente (mistura de referência) só com agregados novos. No quadro 5.12 apresenta-se a composição das diferentes misturas betuminosas estudadas.

Quadro 5.12 - Composição das diferentes misturas betuminosas (% de agregados)

Agregado	A23	A23 Corrigida	EN 346	EN 346 Corrigida	Mistura a Quente
Pó de pedra	-	-	-	-	60
Brita 6/15	-	-	-	-	20
Brita 15/25	-	10	-	20	20
Material fresado A23	100	90	-	-	-
Material fresado EN346	-	-	100	80	-

#### 5.2.4.1 Composição granulométrica das misturas betuminosas

No Quadro 5.13 e na Figura 5.8 apresentam-se a granulometria referente às diferentes misturas betuminosas estudadas.

Quadro 5.13 - Granulometria das misturas recicladas temperadas e da mistura betuminosa a quente

Abertura das malhas (mm)	% Acumulada do material passado					
	Mistura A23	Mistura A23 Corrigida	Mistura EN346 Corrigida	Mistura EN346	Mistura a quente	Fuso AC20 BASE
25	100	100	99	99	100	100
19	98	96	93	99	91	90-100
12,5	90	82	72	86	55	57-86
4	47	43	41	52	31	34-49
2	35	32	29	37	22	26-41
0,5	20	18	14	17	11	12-26
0,125	7	6	5	6	2	4-14
0,063	2	2	1	1	1	2-7
Resíduo	0	0	0	0	0	-

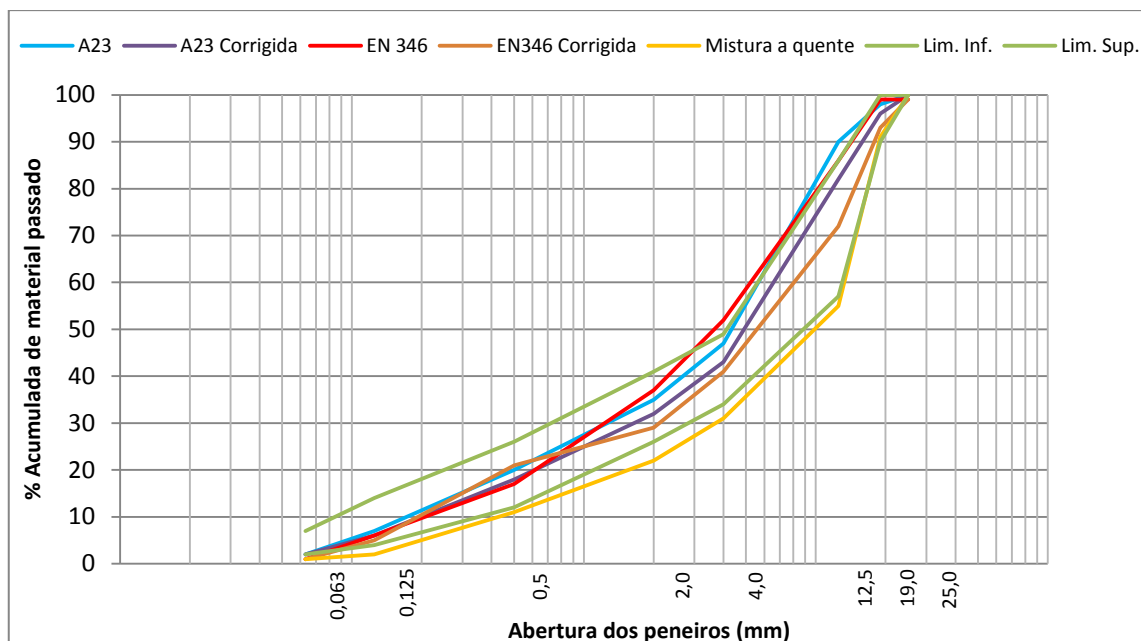


Figura 5.8 - Curvas granulométricas das misturas recicladas temperadas e da mistura betuminosa a quente

#### 5.2.4.2 Estimativa da percentagem de ligante

A quantidade inicial de ligante das misturas produzidas em laboratório é calculada através da expressão empírica que tem por base a superfície específica dos agregados:

$$Pb_R = 0,035 \times A + 0,045 \times B + K \times p_{200} + F \quad (5.4)$$

Onde:

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

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

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

$p_{200}$  - Percentagem de agregados de dimensão inferior a 0,075;

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

$K = 0,15$ , para 11 a 15% passados no peneiro nº200 mm

$K = 0,18$ , para 6 a 10% passados no peneiro nº200 mm

$K = 0,20$ , para  $\leq 5\%$  passados no peneiro nº200 mm

$F$  - Fator de absorção dos agregados (entre 0 e 2%), na falta de informação considera-se  $F=0,7\%$ ;

No caso das misturas betuminosas recicladas, a percentagem de ligante novo a adicionar à mistura ( $Pb_N$ ), considera a percentagem de ligante envelhecido presente na mistura. À percentagem de betume total da mistura final reciclada ( $Pb_R$ ) deverá subtrair-se a percentagem de betume envelhecido contido na mistura betuminosa fresada, de acordo com a taxa de reciclagem ( $TR$ ) incorporada na mistura. Através da expressão 5.5, obtém-se a percentagem de betume novo a adicionar à mistura em relação à massa total. Os resultados apresentam-se no Quadro 5.14.

$$Pb_N = Pb_R - \frac{Pb_{MB} \times TR}{100} \quad (5.5)$$

Onde:

$Pb_N$  - Percentagem de betume novo em relação à massa total da mistura;

$Pb_R$  - Percentagem de betume total da mistura reciclada em relação à massa total da mistura, calculada em 5.4;

$Pb_{MB}$  - Percentagem de betume das misturas betuminosas fresadas;

$TR$  - Taxa de reciclagem.

Quadro 5.14 - Percentagem de betume novo e do betume total da mistura reciclada

Misturas betuminosas	$Pb_R$ (%)	$Pb_N$ (%)
A23	4,86	-0,28
A23 Corrigida	4,73	0,20
EN 346	4,83	-0,18
EN 346 Corrigida	4,65	0,78
Mist. Referência	4,58	-

A emulsão betuminosa é constituída por água e betume, deste modo é necessário transformar a percentagem de betume novo ( $Pb_N$ ) em uma percentagem referente à emulsão ( $E$ ). Através da expressão 5.6 obtém-se a quantidade de emulsão a adicionar às misturas betuminosas.

$$E(\%) = \frac{Pb_N}{X} \times 100 \quad (5.6)$$

Onde:

$Pb_N$  - Percentagem de betume novo calculado em relação à massa total da mistura;

$X$  - Teor em betume da emulsão betuminosa;

$E$  (%) - Percentagem de emulsão betuminosa a adicionar à mistura betuminosa.

No Quadro 5.15 apresentam-se os resultados obtidos da percentagem de emulsão necessária para adicionar às misturas betuminosas recicladas temperadas.

Quadro 5.15 - Percentagem de emulsão betuminosa

Misturas betuminosas	E (%)
A23	-0,46
A23 Corrigida	0,32
EN 346	-0,18
EN 346 Corrigida	1,3

Analisando os Quadros 5.14 e 5.15, conclui-se que os resultados teoricamente obtidos através da superfície específica para as misturas betuminosas com 100% de material fresado apresentam valores negativos, o que significaria que teriam ligante a mais. Isto demonstra que este cálculo não é suficiente, sendo importante determinar a penetração do ligante final da mistura reciclada (betume envelhecido + ligante novo) para se determinar a quantidade de emulsão betuminosa a adicionar, através da expressão 5.7.

$$\log(\text{pen}_R) = TRb \times \log(\text{pen}_F) + (1 - TRb) \times \log(\text{pen}_N) \quad (5.7)$$

$$TRb = \frac{TR \times pb_F}{pb_R} \quad (5.8)$$

Onde:

$\text{pen}_R$  - Penetração do ligante final ( $10^{-1}$  mm);

$TRb$  - Taxa de reciclagem de betume determinada através da expressão 5.8;

$\text{pen}_F$  - Penetração do ligante envelhecido do material fresado ( $10^{-1}$  mm);

$\text{pen}_N$  - Penetração do betume novo ( $10^{-1}$  mm).

Para a penetração do ligante final ( $\text{pen}_R$ ) estabeleceu-se um valor mínimo de  $30 \times 10^{-1}$  mm, visto que, em Portugal são frequentemente utilizados betumes com gamas de penetração entre  $35$  e  $50 \times 10^{-1}$  mm. O Quadro 5.16 apresenta os resultados obtidos referentes à penetração do ligante final da mistura através da expressão 5.7.

Quadro 5.16 - Cálculo da penetração do ligante final

Mistura Betuminosa	TR (%)	Pb <sub>F</sub> (%)	pen <sub>F</sub> (0,1 mm)	pen <sub>N</sub> (0,1 mm)	Pb <sub>R</sub> (%)	Pb <sub>N</sub> (%)
A23	100	5,14	15,3	110	7,8	2,66
A23 Corrigida	90	5,14	15,3	110	7	2,38
EN 346	100	4,84	4	110	12,3	7,46
EN 346 Corrigida	80	4,84	4	110	9,9	6

Previamente as misturas betuminosas produziram-se com 2% de emulsão betuminosa. No entanto, verificou-se que os provetes apresentavam um aspeto seco e os agregados não se apresentavam totalmente revestidos por uma película de emulsão betuminosa. Desta forma, foi necessário produzir provetes com mais 1% de emulsão e analisar o seu aspeto visual. Nos provetes com 3% de emulsão, os agregados apresentavam uma boa adesividade, um recobrimento total dos seus agregados e uma boa aderência entre eles. Ainda assim, produziram-se provetes com 4% de emulsão e verificou-se que tinham ligeiro excesso de emulsão. No trabalho experimental produziram-se misturas betuminosas temperadas com 2%, 3% e 4%. A mistura a quente (mistura de referência) produziu-se com 5% de betume.

#### 5.2.4.3 Determinação da percentagem ótima de emulsão betuminosa

A percentagem ótima de emulsão determinou-se com base no ensaio de rigidez à tração em compressão diametral. Assim, produziram-se e compactaram-se misturas de acordo com o estudo de composição apresentado no Quadro 5.12 com quantidades diferentes de emulsão (2%, 3% e 4%). Os agregados e o material fresado foram aquecidos a 110 °C e a emulsão betuminosa foi adicionada à temperatura ambiente.

No final obtiveram-se cerca de 12 misturas betuminosas recicladas temperadas diferentes e para cada mistura fabricou-se em laboratório três provetes, completando no final 36 provetes (Figura 5.10) para serem submetidas ao ensaio de módulo de rigidez de tração em compressão diametral (Figura 5.11). Para a mistura betuminosa a quente produziram-se em laboratório apenas 3 provetes com 5% de betume.



Figura 5.9 - Produção de provetes cilíndricos

A norma 12697-26: 2004 (*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Parte 26: Stiffness*) - Anexo C, expõe o procedimento utilizado para classificar as misturas betuminosas com base na rigidez. As amostras cilíndricas (com cerca de 100 mm de diâmetro e altura variável) submeteram-se ao ensaio de tração em compressão diametral nos laboratórios DECA-UBI.

A compactação foi realizada através do compactador de impacto, de acordo com a norma 12697-30: 2004 (*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 30: Specimen preparation by impact compactor*), com aplicação de 50 pancadas em cada face do provete a uma temperatura de 70 °C.



Figura 5.10 - Provetes cilíndricos submetidos ao ensaio rigidez à tração em compressão diametral (ITSM)



Figura 5.11 - Ensaio de rigidez à tração em compressão diametral (DECA-UBI)

Segundo a norma 12697-26: 2004, o ensaio para a determinação da resistência à tração estática consiste na aplicação de duas forças diametralmente opostas sobre uma amostra cilíndrica e que geram, ao longo do diâmetro solicitado, tensões de tração uniformes perpendiculares a esse diâmetro.

Os provetes cilíndricos colocam-se entre duas barras de aço, sendo uma das faces côncavas de forma a ajustar-se perfeitamente ao provete. O provete apoia-se na parte côncava da barra inferior e o carregamento é transmitido através da barra superior. Por fim coloca-se um sistema que permite que os transdutores de deslocamento fiquem devidamente localizados, ou seja, diametralmente opostos. O ensaio é realizado em condições de tensão controlada, sendo o controlo dos impulsos efetuados pelo *software* do equipamento. O programa admite algumas simplificações para o cálculo do estado de tensão dentro do provete, e consequentemente para avaliação da carga que lhe é aplicada. O coeficiente de *Poisson* é constante e conhecido (assumiu-se que para uma temperatura de ensaio de 20 °C possui o valor de 0,35). O provete é submetido a um estado de tensão plana, sendo que o comportamento é elástico linear, e o material é homogéneo e isotrópico.

O ensaio realizou-se para os seguintes tempos de cura: 1°, 7°, 14°, 21° e 28° dia. Nos gráficos da Figura 5.12, apresentam-se os valores sintetizados referentes às misturas betuminosas produzidas no âmbito deste estudo.

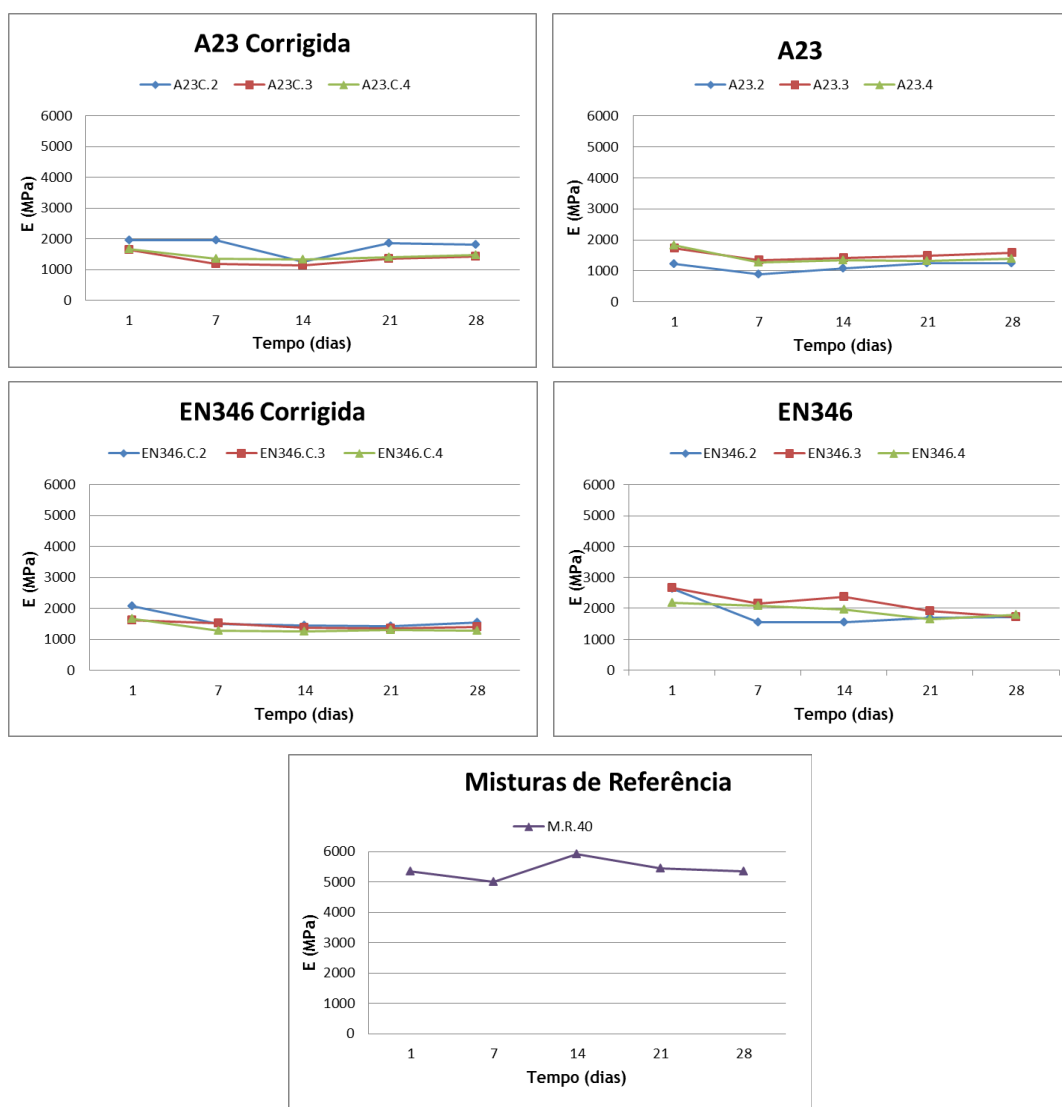


Figura 5.12 - Variação do módulo de rigidez (compactação a 70 °C)

Através dos resultados obtidos do ensaio de rigidez à tração em compressão diametral é possível selecionar o teor de emulsão mais vantajoso para a composição das misturas betuminosas recicladas temperadas. Com base nos resultados obtidos por outros autores verifica-se que a compactação a 70 °C influencia a rigidez, apresentando valores de rigidez inferiores. Analisando os resultados verifica-se que a partir do 21º dia o módulo de rigidez apresenta valores quase estáveis. A análise dos valores de rigidez dos provetes cilíndricos, constituídos com 100% de material fresado, submetidos ao ensaio em períodos de cura diferentes permite concluir que o teor ótimo de emulsão é 3%.

As misturas corrigidas apresentam valores superiores em módulo de rigidez para um teor de 2%. No entanto, verificou-se que 2% era insuficiente para revestir os agregados na totalidade com uma película de emulsão betuminosa, deste modo as características pretendidas para a mistura seriam condicionadas, como a trabalhabilidade, a coesão e a adesividade, implicando consequências negativas na aderência de todos os constituintes e mais tarde no seu

desempenho. Os provetes com 3% e 4% de emulsão apresentam valores de rigidez semelhantes, mas durante a produção dos provetes com 4% de emulsão betuminosa em laboratório verificou-se que tinham excesso de emulsão. Em concordância com este facto e com os valores em módulo de rigidez para as misturas com 100% de material fresado optou-se por utilizar um teor ótimo de emulsão de 3% para todas as misturas betuminosas temperadas.

A baridade dos provetes cilíndricos determinou-se de acordo com a norma de ensaio EN 12697-6: 2003 *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Parte 6: Determination of bulk density of bituminous specimens*. A baridade dos provetes cilíndricos calculou-se através da expressão 5.9 e os resultados apresentam-se no Quadro 5.17.

$$\rho_{bssd} = \frac{M_1}{M_3 - M_2} \times \rho_w \quad (5.9)$$

Onde:

$\rho_{bssd}$  - Baridade do provete ( $\text{kg/m}^3$ );

$M_1$  - Massa da amostra secar ao ar (g);

$M_2$  - Massa da amostra saturada (g);

$M_3$  - Massa da amostra saturada com superfície seca (g);

$\rho_w$  - Massa volúmica da água à temperatura de ensaio ( $\text{kg/m}^3$ ).

Quadro 5.17 - Baridade média dos provetes cilíndricos com 3% de emulsão betuminosa

Provetes Cilíndricos	Baridade Média
	( $\text{kg/m}^3$ )
A23	2076
A23 Corrigida	2070
EN346	2208
EN346 Corrigida	2214
Mist. Referência	2419

### 5.3 Avaliação do desempenho das misturas betuminosas

O desempenho dos pavimentos é entendido como a capacidade de suportar cargas do tráfego e de este oferecer uma superfície de circulação confortável aos condutores. Quanto à componente funcional o desempenho é estudado a partir da observação dos parâmetros de estado irregularidade longitudinal e transversal, atrito e degradações superficiais (Pereira e Freitas, 2001).

Em suma, os ensaios de desempenho permitem avaliar de uma forma concisa o comportamento das misturas betuminosas face às várias condições adversas a que se expõem. Assim, realizaram-se ensaios para a caracterização do comportamento à resistência de deformações permanentes, ensaios de resistência à fadiga e ensaio de sensibilidade à água.

De seguida, descrevem-se os ensaios realizados para a caracterização da resistência à deformação permanente, para a caracterização do comportamento à fadiga, e por fim o ensaio de sensibilidade à água.

#### 5.3.1 Caracterização da resistência à deformação permanente

O ensaio da resistência à deformação permanente permite determinar a suscetibilidade dos materiais betuminosos se deformarem sob carga, consistindo na medição da profundidade de rodeira do provete formada pelas sucessivas passagens da roda em condições de temperatura constante (45 °C). Esta opção deve-se ao facto das misturas betuminosas recicladas temperadas se aplicarem em camadas de base e nunca atingirem os 60 °C como temperatura superficial (Dinis-Almeida, 2010).

O ensaio realizou-se de acordo com a norma EN 12697-22: 2004 *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 22: Wheel Tracking*.

Para a realização deste ensaio produziram-se em laboratório três lajetas para as misturas betuminosas temperadas e duas para a mistura convencional, com 30x30x6 cm<sup>3</sup>. A cada mistura betuminosa temperada foi adicionado 3% de emulsão betuminosa (teor ótimo de emulsão) e à mistura de referência adicionou-se 5% de betume. Teve-se especial cuidado no controlo da temperatura de compactação das misturas, de modo a que fosse realizada entre os 80 °C e 90 °C, pois a compactação a uma temperatura inferior poderia influenciar negativamente na baridade das lajetas. Na Figura 5.13 pode-se observar como se procedeu à compactação das lajetas.

Posteriormente, as lajetas colocaram-se sobre uma superfície plana à temperatura ambiente durante um mês, para serem submetidas ao ensaio de resistência à deformação permanente.



Figura 5.13 - Sequência da produção/compactação das lajetas para o ensaio à deformação permanente

A baridade das lajetas determinou-se de acordo com a norma de ensaio EN 12697-6: *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Parte 6: Determination of bulk density of bituminous specimens*. O Quadro 5.18 apresenta os valores médios obtidos.

Quadro 5.18 - Baridade média das lajetas moldadas para o ensaio à deformação permanente

Provete Lajeta	Baridade Média
	(kg/m <sup>3</sup> )
A23 Corrigida	2162
A23	2025
EN346 Corrigida	2235
EN346	2223
Mistura de Ref.	2320

Analisando os resultados do Quadro 5.18, verifica-se que as misturas produzidas com material fresado da A23 apresentam valores de baridade mais baixos, isto deve-se ao facto de terem sido as primeiras lajetas a serem compactadas e não se ter aplicado a placa vibratória de maneira correta. Ainda assim, a placa vibratória não apresentava uma compactação uniforme.

O ensaio realizou-se em conformidade com a norma EN 12697-22: 2003, realizou-se em equipamento pequeno e acondicionado ao ar, sendo que, o procedimento adotado foi o procedimento B (Figura 5.14).

Para avaliar o comportamento da mistura nos ensaios laboratoriais deve-se utilizar temperaturas representativas das condições a que a mistura estará sujeita em serviço. Como a acumulação de deformações ocorre essencialmente e mais rapidamente com temperaturas elevadas é comum a utilização de temperaturas entre 40 °C e 60 °C. Antecipadamente ligou-se o equipamento e durante 4h, mantendo-se uma temperatura de 45 °C.

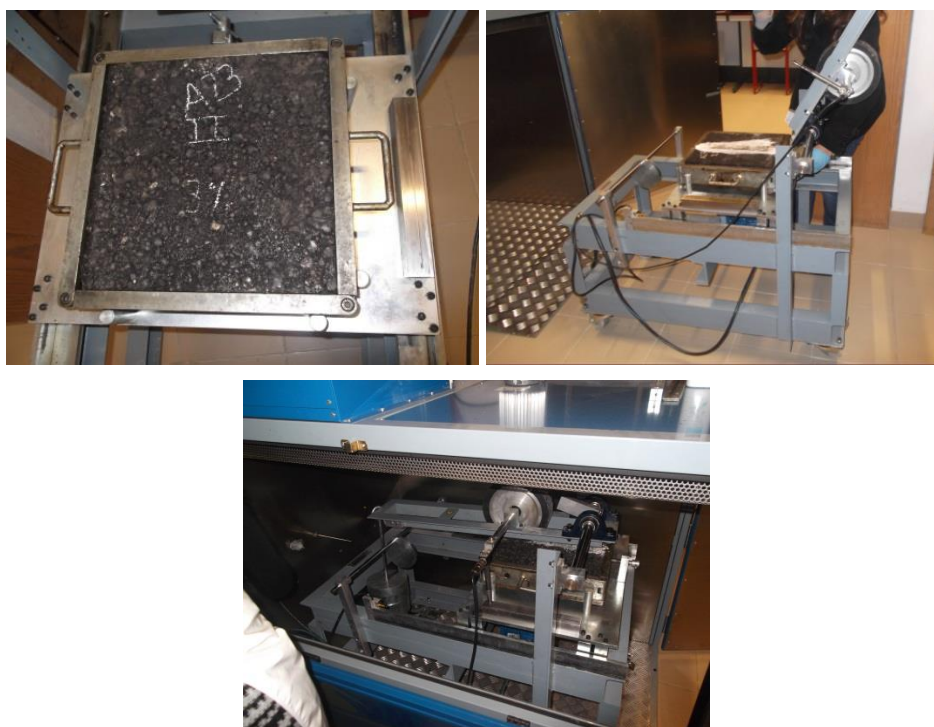


Figura 5.14 - Equipamento pequeno acondicionado ao ar (Procedimento B)

Para a realização do ensaio aplicaram-se 10 000 ciclos de carga a cada lajeta, deste modo o ensaio ficaria concluído após este número de ciclos ou quando fosse atingida a profundidade de 20 mm. A Figura 5.15 apresenta o aspeto final das lajetas depois do ensaio.



Figura 5.15 - Aspeto das lajetas após o ensaio de resistência à deformação permanente

Os resultados obtidos no ensaio de resistência à deformação permanente são a variação média da deformação permanente ao ar - *Wheel Tracking Slope (WTS)* e a média proporcional de profundidade da rodeira nos três provetes ensaiados - *Mean Proportional Rut Depth (PRD)*.

O resultado da variação da deformação permanente é calculado através da expressão 5.10, onde  $d_{5000}$  e  $d_{10000}$ , em mm, correspondem à profundidade de rodeira após 5000 e 10000 ciclos, respetivamente. O Figura 5.16 apresenta as curvas referente à deformação das lajetas aos 10 000 ciclos.

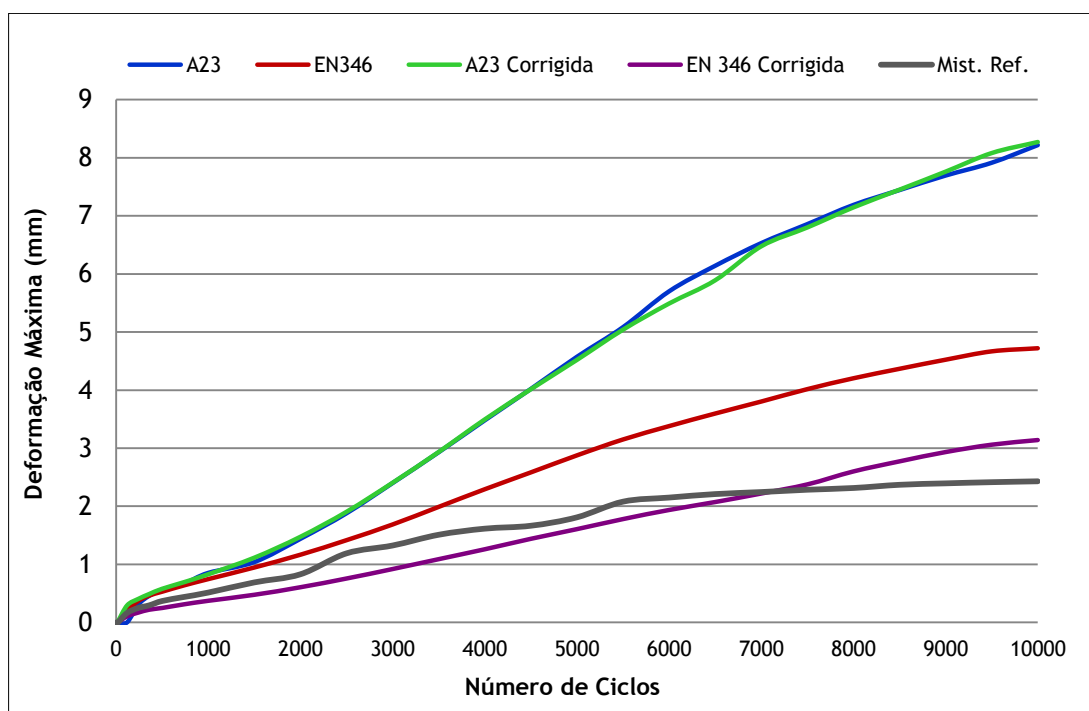


Figura 5.16 - Deformação máxima obtida pelo ensaio de simulação de pista (*Wheel tracking*) em laboratório (De acordo com EN 12697 - 22: 2003, Procedimento B)

$$WTS = \frac{d_{10000} - d_{5000}}{5} \quad (5.10)$$

Onde:

$WTS_{AIR}$  - Variação média da deformação permanente ao ar;

$d_{10000}$  - profundidade de rodeira após 10 000 ciclos;

$d_{5000}$  - profundidade de rodeira após 5000 ciclos.

O Quadro 5.19 apresenta o declive máximo da rodeira (WTS) e a deformação máxima (média) das lajetas.

Quadro 5.19 - Ensaio de simulação de pista - *Wheel tracking* (Procedimento B)

Provetes Lajetas	WTS (mm por 10 <sup>3</sup> ciclos de carga)	PR <sub>D</sub> (mm)
A23	0,65	8,31
A23 Corrigida	0,75	8,27
EN 346	0,37	4,72
EN 346 Corrigida	0,31	3,14
Mist. Ref.	0,12	2,43

Uma vez que não existem valores especificados em Portugal para os resultados do ensaio de pista em laboratório, o Quadro 5.20 apresenta os valores limites considerados em Espanha, para camadas base de pavimentos, realizados de acordo com o especificado na norma europeia EN 12697-22, pelo procedimento B.

Quadro 5.20 - Declive máximo da rodeira a 45 °C (WTS) para o ensaio de simulação de pista (adaptado da Especificação da D. G. Carreteras, 2008 - OC 24/08, art. 542)

Zona Térmica Estiva	WTS (mm por 10 <sup>3</sup> ciclos de carga)		
	Categoria de tráfego pesado		
	T00 e T0	T1	T2 e T3
Quente	0,07	0,07	0,1
Média	0,07	0,1	-
Temperada	0,1	-	-

Após a análise dos resultados obtidos verifica-se que as misturas betuminosas recicladas temperadas deformaram-se mais do que a mistura de referência. Ainda assim, a mistura com material fresado da EN346 corrigida apresentou uma profundidade ligeiramente superior à mistura a quente (cerca de 2,4 mm). A mistura com 100% de material fresado da EN346 apresentou uma deformação aproximadamente de 4,7 mm.

As misturas que mostraram maior suscetibilidade à deformação permanente foram as misturas com material fresado proveniente da A23, apresentando valores na ordem dos 8,3 mm. Na determinação da baridade destas misturas obtiveram-se valores inferiores aos restantes ocorrendo maior número de espaços vazios e consequentemente apresentado maior deformação.

Salienta-se ainda o facto de betume envelhecido do fresado da EN 346 apresentar uma penetração muito inferior ao da A23, influenciando, naturalmente, o resultado do ensaio de *Wheel Tracking*. Estas apresentaram maior resistência à deformação permanente.

O Quadro 5.19 evidencia que a mistura a quente apresenta uma taxa de deformação mínima e de acordo com o Quadro 5.20 constata-se que o declive da rodeira obtido está de acordo com o recomendado na especificação espanhola.

Em comparação com resultados aferidos por Dinis-Almeida (2010), estes consideram-se valores razoáveis, visto que obteve para lajetas com 2% de emulsão (Procedimento B, ao ar) uma deformação média aos 10000 ciclos de 14,6 mm.

### 5.3.2 Caracterização da resistência à fadiga

O ensaio de resistência à fadiga realizou-se de acordo com a norma EN 12697-24: 2004 *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Pat 24: Resistance to fatigue*. Esta norma descreve o método usado para caracterizar o comportamento de misturas betuminosas sob a carga de fadiga no equipamento de ensaio em quatro pontos de flexão.

Com base na metodologia de formulação produziram-se e compactaram-se em laboratório lajetas para posteriormente se obterem vigas prismáticas.

As misturas betuminosas recicladas temperadas produziram-se com 3% de emulsão betuminosa e material fresado aquecido a uma temperatura de 110 °C. Na mistura de referência (mistura a quente) adicionou-se 5% de betume aos agregados aquecidos em estufa a 170 °C.

A compactação realizou-se através de um cilindro de rasto liso (cilindro de rolos) no exterior do laboratório (DECA-UBI), a uma temperatura de 90 °C (Figura 5.17).



Figura 5.17 - Produção e compactação da lajeta com o cilindro de rolos

As vigas prismáticas para a realização do ensaio foram obtidas através do corte das lajetas em laboratório (Figura 5.18), de acordo com a EN 12697-33, cada lajeta foi serrada de modo a

obterem-se seis vigas com dimensões aproximadas de 40.0 x 5.0 x 5.0 cm (Figura 5.19). Depois de devidamente serradas as vigas foram armazenadas numa superfície plana, durante 30 dias, em condições de temperatura e humidade favoráveis.



Figura 5.18 - Serragem das vigas em laboratório (DECA-UBI)



Figura 5.19 - Vigas prismáticas obtidas através da serragem das lajetas

A baridade das vigas determinou-se de acordo com a norma de ensaio EN 12697-6 *Test methods for hot mix asphalt - Part 6: Determination of bulk density of bituminous specimens* (Figura 5.20).



Figura 5.20 - Preparação das vigas prismáticas para se calcular a baridade

Os resultados apresentam-se no Quadro 5.21 para as vigas de mistura temperadas com 3% de emulsão betuminosa e para as vigas de misturas betuminosas a quente com 5% de betume.

Quadro 5.21 - Baridade média das vigas prismáticas

Vigas prismáticas	Baridade Média (kg/m <sup>3</sup> )
A23	2339
A23 Corrigida	2384
EN346	2429
EN346 Corrigida	2419
Mist. Referência	2392

Comparando os resultados obtidos para a baridade verifica-se que alguns valores são ligeiramente mais baixos, isto deve-se ao facto de a lajeta ter sido compactada no exterior do laboratório em condições atmosféricas diferentes, influenciando a temperatura de compactação e, conseqüentemente, a baridade.

O método para caracterizar as misturas betuminosas sob a carga de fadiga, no equipamento de ensaio em quatro pontos de flexão, ocorre com uma rotação periódica livre e translação (horizontal) em todos os pontos de carga. A flexão é realizada pelo movimento do centro do ponto de carga no sentido vertical e perpendicular ao eixo longitudinal do provete.

A deslocação periódica aplicada é simétrica em relação ao ponto zero, sinusoidal, e a amplitude de deslocamento deve ser constante em função do tempo, deste modo, durante o ensaio, a força necessária para a deformação da viga é medida como uma função do tempo, bem como a diferença de fase entre o sinal de força e de deslocamento do sinal. Na Figura 5.21 representa os principais conceitos do elemento de teste.

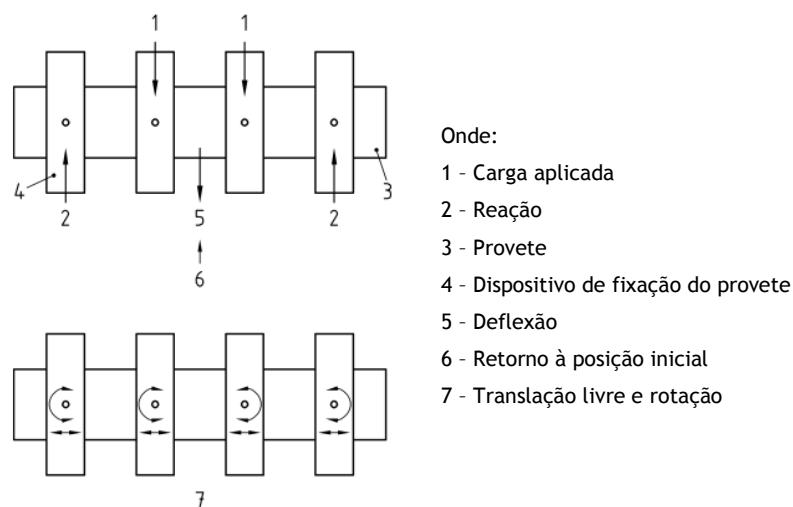


Figura 5.21 - Princípios básicos para ensaio de resistência à fadiga em quatro pontos de flexão (4PB-PR)

A medida de comprimento, largura e altura são calculadas através da média aritmética das medidas de comprimento.

As vigas são colocadas num sistema composto por duas amarras externas (as reações) e duas amarras internas (as ações). Estas amarras têm como função segurar o provete, conferindo-lhe liberdade de rotação e de translação horizontal para não provocar tensões adicionais na viga. Este ensaio consiste na aplicação de um carregamento sinusoidal repetido, através do sistema que agarra o provete, sendo assim permitida a inversão do sentido de carga com a recuperação da deformação produzida pelos sucessivos carregamentos.

O equipamento utilizado de flexão em quatro pontos foi o “*Stand Alone Four Point Bending Beam*”, fabricado pela *Cooper Research Technology*. O equipamento está inserido numa câmara climática e está acoplado a um sistema servo hidráulico, que permite manter a temperatura a 20 °C.

A deformação sofrida pelo provete é medida por um transdutor do tipo LVDT, que fica localizado a meio vão da viga, permitindo obter através da teoria da elasticidade a determinação da extensão máxima de tração instalada.

A aplicação de vários carregamentos no pavimento betuminoso provoca perda de resistência e leva ao seu fendilhamento. Quanto mais elevados os esforços de tração instalados, menor o número de carregamentos que provocam a rotura. A resistência à fadiga depende do estado de tensão induzido, pelo que as leis de comportamento obtidas em laboratório, relacionam o número de repetições de carga correspondente à rotura por fadiga desse material (N) com a extensão de tração máxima, aplicada em cada ciclo ( $\epsilon$ ). Os resultados dos ensaios de fadiga foram interpretados com base na lei da fadiga (Dinis-Almeida, 2010).

$$\epsilon = A \times N^B \quad (5.11)$$

Onde:

N - Número de aplicações de carga até à rotura;

$\epsilon$  - Extensão de tração ( $10^{-6}$ );

A, B - Coeficientes determinados experimentalmente.

As variáveis importantes para avaliar a resistência das misturas betuminosas e que são utilizadas em conjunto com as leis de fadiga para avaliar o desempenho das misturas de desempenho são:

$N_{100}$  - Resistência à fadiga para a extensão de  $100 \times 10^{-6}$ ;

$\epsilon_6$  - Extensão para uma resistência à fadiga igual a  $1 \times 10^6$ .



Figura 5.22 - Equipamento inserido numa câmara climática ligado a um sistema servo hidráulico

O módulo de rigidez de uma mistura betuminosa depende principalmente da temperatura e do tempo de carga, ainda assim, as condições climáticas e a velocidade de tráfego tem extrema importância na determinação da rigidez do pavimento betuminoso.

Os ensaios de resistência à fadiga realizaram-se em três níveis de extensão,  $200 \times 10^{-6}$ ,  $300 \times 10^{-6}$  e  $400 \times 10^{-6}$ , sendo a frequência de aplicação de carga de 10 Hz e a temperatura de 20 °C.

A norma EN 12697-26 preconiza que o módulo de rigidez inicial da mistura seja tomado como referência para determinar o momento da rotura do provete, correspondendo a uma redução de 50% relativamente ao valor inicial.

Para cada tipo de misturas betuminosas realizaram-se dois ensaios para cada nível de extensão (Quadro 5.22). O primeiro ensaio realizou-se com uma extensão de 200  $\mu\text{m}/\text{m}$ , uma vez que, para este nível de extensão a duração do ensaio para algumas vigas foi superior a dois dias.

Quadro 5.22 - Números de ciclos do ensaio de resistência à fadiga

Extensão	Vida à fadiga (Ciclos)				
	A23	EN346	A23 Corrigida	EN346 Corrigida	Mist. Ref.
200	180744	5854499	277499	234557	83378
200	121730	635999	64102	362860	1075499
400	11999	111999	38499	18500	25499
400	38999	63499	32999	17499	89999
600	1200	1845	8499	1507	1209
600	1173	2359	1500	6699	599

Os resultados obtidos encontram-se apresentados na Figura 5.23 para as vigas ensaiadas em laboratório (DECA-UBI) compactadas com 3% de emulsão betuminosa e 5% de betume, e com um mês de cura.

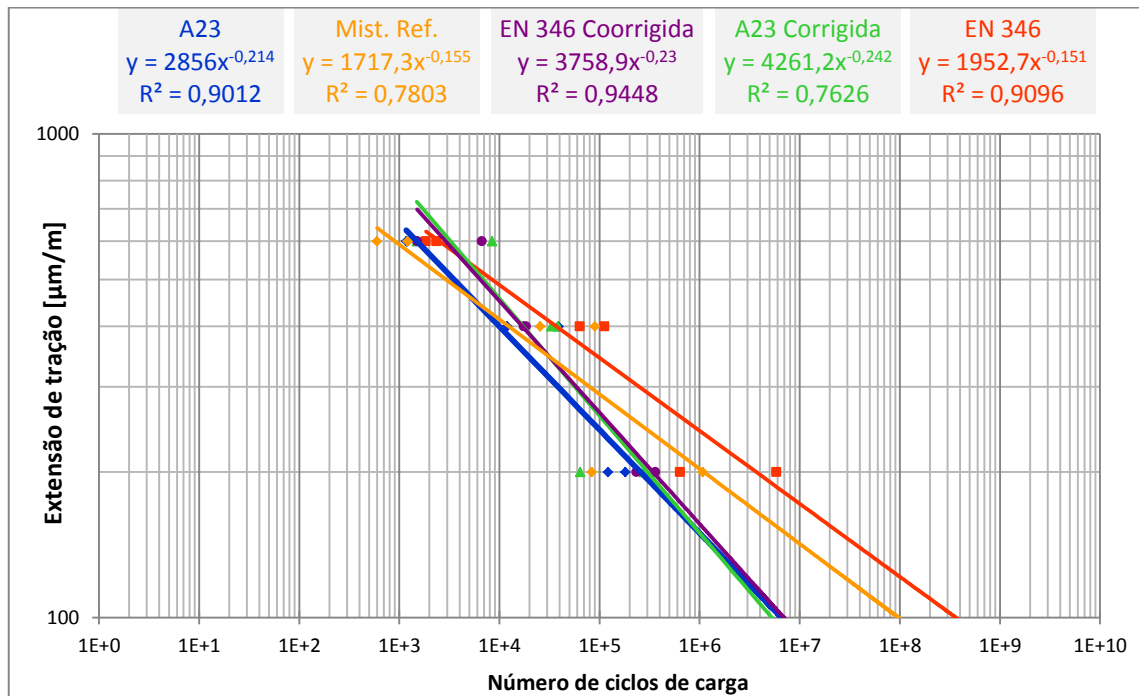


Figura 5.23 - Leis de fadiga para as vigas prismáticas

No Quadro 5.23 apresentam-se os coeficientes relativos às leis de fadiga obtidos para as diferentes misturas estudadas.

Quadro 5.23 - Coeficientes obtidos pela lei de fadiga

Parâmetros	Misturas				
	A23	A23 Corrigida	EN346	EN346 Corrigida	Mist. Ref.
A	2856	4261,2	1952,7	3758,9	1717,3
B	-0,214	-0,242	-0,151	-0,23	-0,155
R <sup>2</sup>	0,9012	0,7626	0,9096	0,9448	0,7803
ε <sub>6</sub>	148,51	150,50	242,46	156,70	201,77
N <sub>100</sub>	6347584	5415056	352577944	7048396	92629535

Analisando a Figura 5.23 e o Quadro 5.23 concluiu-se que as misturas betuminosas recicladas temperadas apresentam um coeficiente de correlação (R<sup>2</sup>) superior à mistura a quente,

excetuando a mistura betuminosa temperada com material fresado da A23 corrigida. As misturas corrigidas apresentam retas com inclinação muito semelhante, assim como a EN346 e a misturas de referência. Conclui-se ainda, que a mistura reciclada temperada com 100% de material fresado da EN346 apresenta maior resistência à fadiga, apresentando maiores valores para os vários níveis de extensão.

A seguir apresentam-se uma comparação dos valores obtidos com outros autores para os valores de  $\epsilon_6$  (extensão de tração para que haja rotura do material ao fim de 1 milhão de ciclos).

Baptista (2006), obteve para misturas convencionais (mistura a quente) valores  $\epsilon_6$  de 158  $\mu\text{m}$  e para misturas recicladas a quente com 30% de incorporação de material fresado, obteve valores de 202  $\mu\text{m}$ .

Dinis-Almeida (2010), obteve valores de 195  $\mu\text{m}$  numa mistura com 100% de material fresado e 2% de emulsão, com 6 meses de cura e compactada com cilindro de rolos.

A mistura com 100% de material fresado proveniente da EN346 com 3% de emulsão obteve valores  $\epsilon_6$  de 242  $\mu\text{m}$ , assim como a mistura a quente obteve valor  $\epsilon_6$  de 202  $\mu\text{m}$ , estando em concordância com os valores obtidos pelos autores previamente citados.

A mistura com material fresado da A23 e as misturas corrigidas apresentaram valores inferiores (na ordem dos 150  $\mu\text{m}$ ), sendo análogos aos valores obtidos para misturas tradicionais a quente por Baptista (2006).

Em todas as misturas a resistência à fadiga para a extensão de  $100 \times 10^{-6}$  ( $N_{100}$ ) apresenta valores elevados. Contudo, as misturas produzidas com material fresado da A23 são as que apresentam uma resistência à fadiga menor.

Em suma, os resultados obtidos para as várias misturas fabricadas no âmbito deste estudo, apresentam-se satisfatórios comparativamente a valores obtidos por outros autores.

### **5.3.3 Ensaio de sensibilidade à água (ITSR)**

A sensibilidade à água é uma propriedade determinada 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*). Esta descreve um método de ensaio para determinar o efeito de saturação e o condicionamento sobre a resistência à tração de provetes cilíndricos.

Inicialmente o ensaio consistiu na preparação de um conjunto de 6 provetes cilíndricos, estes caracterizaram-se volumetricamente e em seguida dividiram-se em dois subconjuntos que se colocaram em condições distintas. O primeiro subconjunto foi acondicionado ao ar (grupo seco), a uma temperatura constante de  $20\pm 5$  °C. O segundo subconjunto (grupo imerso) submeteu-se a vácuo em água a  $20\pm 5$  °C, sendo posteriormente colocados a saturar em água temperatura de  $40\pm 1$  °C, durante um período de 68 a 72 horas (Figura 5.24).



Figura 5.24 - Ensaio de sensibilidade á água: provetes submetidos a vácuo e provetes imersos em água

A norma indica que deve ser verificado o volume das amostras cilíndricas depois de serem submetidos a vácuo, estes não devem apresentar um aumento de volume a 2%.

As dimensões das amostras cilíndricas foram determinadas de acordo com a EN 12697-29: 2002 (*Determination of the dimensions of a bituminous specimen*) e com a EN 12697-6: 2003 (*Determination of bulk density of bituminous specimens*).

No final deste procedimento, todos os dos corpos de prova foram submetidos ao ensaio para determinar o índice de tração indireta (ITSR - *Indirect Tensile Strength Ratio*) a uma temperatura de ensaio entre 5 °C e 25 °C. De acordo com a norma EN 13108-20: 2006 (*Bituminous mixtures - Material specifications Parte 20: Type testing*) a temperatura recomendada é de 15 °C.

Após o período de 68h os provetes cilíndricos foram retirados da água a 40 °C e colocados imersos em água a 15 °C durante mais 2 horas. O outro subconjunto que permanecia na sala à temperatura de  $20\pm 5$  °C foi retirado e colocado num ambiente seco a 15 °C durante mais 2 horas.

Os provetes dos dois subconjuntos foram submetidos ao ensaio de compressão diametral (Figura 5.25), através de aplicação de uma carga com velocidade constante de  $50 \pm 2$  mm/min, de acordo com o preconizado na norma EN 12697-23: 2003, *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 23: Determination of the indirect tensile strength of bituminous specimens*.



Figura 5.25 - Provede submetido ao ensaio de tração em compressão diametral

As resistências à tração em compressão diametral foram calculadas pela expressão 5.12:

$$ITS = \frac{2P}{\pi DH} \quad (5.12)$$

Onde:

$ITS$  - resistência à tração indireta (GPa);

$P$  - resistência máxima média (KN);

$D$  - diâmetro da amostra (mm);

$H$  - altura da amostra (mm).

A resistência conservada em tração indireta (ITSR) determina-se de acordo com a expressão 5.13:

$$ITSR(\%) = 100 \times \frac{ITS_w}{ITS_d} \quad (5.13)$$

Onde:

$ITS_w$  - Resistência à tração indireta média do grupo de provetes submersos em água (KPa);

$ITS_d$  - Resistência à tração indireta média do grupo de provetes secos (KPa).

A norma EN 12697-23: 2003 preconiza os tipos de falha apresentados na Figura 5.26.

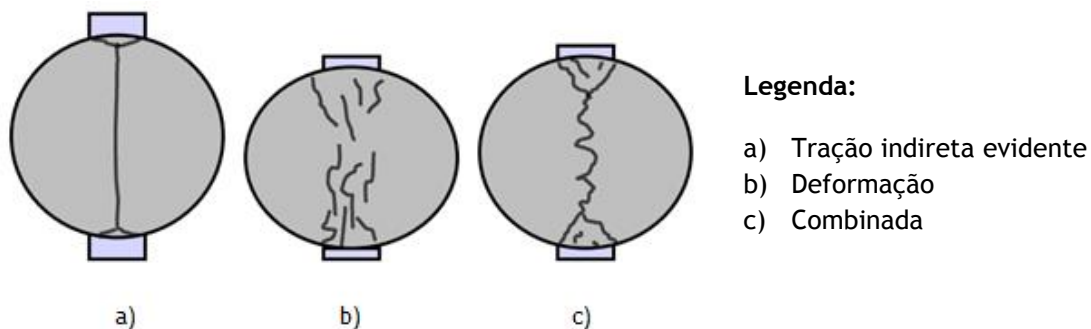


Figura 5.26 - Tipos de rotura dos provetes  
(Fonte: norma EN 12697-23: 2003)

Analisando as deformações obtidas pelos provetes (Figura 5.27) após o ensaio de carga verifica-se que estão de acordo com o indicado pela norma, neste caso o provete apresenta uma pequena fissura assemelhando-se ao caso c).



Figura 5.27 - Aspeto do provete após o ensaio da tração indireta

Os resultados obtidos do ensaio apresentam-se no Quadro 5.24.

Quadro 5.24 - Resistência conservada em tração indireta dos provetes cilíndricos

Determinação da sensibilidade à água de provetes betuminosos EN 12697-12:2008 - Método A - Resistência à tração indireta						
Ensaio de tração indireta EN 12697-23:2003	Un.	A23	A23 Corrigida	EN346	EN346 Corrigida	Mist. Referência
$P_{\text{Grupo "Seco"}}$	KN	9,860	15,880	12,600	4,010	11,090
$P_{\text{Grupo "Imerso"}}$		15,063	11,997	11,577	2,267	9,347
$ITS_d$	KPa	1040	1710	1410	390	1130
$ITS_w$	KPa	1640	1280	1310	210	970
ITSR	%	100	75	93	54	86

O Caderno de Encargos das Estradas de Portugal, S.A. não define parâmetros mínimos para os valores de sensibilidade à água para camadas base ou regularização. De acordo com as especificações espanholas, Art. 542, PG-3, estas indicam que os valores de resistência conservada em tração indireta (ITSR) têm de ser mínimos de 80%.

Na análise dos valores obtidos do ensaio, concluiu-se que o índice de tração indireta (ITSR) em duas amostras é inferior ao esperado, EN346 corrigida e A23 corrigida. Os provetes produzidos para a mistura de referência e os produzidos com 100% de material fresado da EN346 e da A23 obtiveram valores superiores a 80%, indicando que as misturas apresentam pouca suscetibilidade à entrada de água.

Ainda assim, pode concluir-se que as misturas corrigidas perderam capacidade de resistência à água, possivelmente porque houve uma má ligação entre o agregado-ligante, não havendo aderência suficiente ao material fresado, deixando assim espaços vazios onde a água se infiltrou.

O ensaio de sensibilidade à água revela uma fraca exatidão na previsão do desempenho *in situ*. Atualmente, nenhum ensaio de sensibilidade à água foi validado totalmente.

## CAPITULO 6 - Conclusões e trabalhos futuros

### 6.1 Conclusões

O programa experimental consistiu na caracterização dos materiais (agregados naturais e material fresado), determinação do teor de betume envelhecido presente no material fresado, estimativa de ligante novo a adicionar e a formulação das misturas betuminosas de acordo com os requisitos do fuso granulométrico adotado, AC 20 base (MB).

A caracterização prévia do material fresado e a verificação do cumprimento do fuso granulométrico dos agregados, após a extração do betume envelhecido, foi um fator decisivo na obtenção de uma mistura com as características desejadas. O material fresado proveniente da A23 e EN346 apresentava uma granulometria muito semelhante, cumprindo o fuso quase na totalidade, apresentando um ligeiro desvio. Procedeu-se à correção da mistura, adicionando agregados britados.

Com base no ensaio de rigidez à tração em compressão diametral determinou-se a percentagem ótima de emulsão betuminosa. Através dos valores de rigidez obtidos em períodos de cura diferentes (1°, 7°, 14°, 21° e 28° dia), concluiu-se que o teor ótimo de emulsão é de 3%. Após o ensaio procedeu-se ao fabrico das misturas com 3% de emulsão betuminosa, para posteriormente se realizarem os ensaios de desempenho (resistência à fadiga, resistência à deformação permanente e sensibilidade à água).

Uma vez que não existem valores especificados em Portugal para os resultados do ensaio de pista em laboratório (*Wheel tracking*), compararam-se os valores obtidos com os limites considerados em Espanha, para camadas base de pavimentos. A mistura de referência apresenta um declive máximo de rodagem de acordo com o preconizado nas especificações Espanholas, ao invés das misturas betuminosas recicladas temperadas. Os valores obtidos indicam que as misturas betuminosas recicladas temperadas deformaram-se mais do que a mistura de referência. Ainda assim, a mistura com material fresado da EN346 corrigida apresentou uma deformação ligeiramente superior à mistura a quente (cerca de 2,4 mm).

As misturas que mostraram maior suscetibilidade de se deformar com as passagens sucessivas da roda foram as misturas com material fresado proveniente da A23, apresentando valores na ordem dos 8,3 mm. Na determinação da baridade destas misturas obtiveram-se valores inferiores às restantes, correspondendo a um maior número de vazios e, conseqüentemente, apresentando maior deformação. É importante referir que a temperatura de compactação também influencia a baridade das lajetas, ou seja, a uma temperatura de compactação baixa corresponde a um maior número de espaços vazios.

Salienta-se ainda, o facto do betume envelhecido do material fresado da EN 346 apresentar uma penetração muito inferior ao da A23, correspondendo a um betume final mais duro na mistura reciclada. Este facto, influencia naturalmente, o resultado do ensaio de *Wheel tracking*, assim as misturas da A23 apresentaram menor resistência à deformação permanente. Embora os valores para as misturas betuminosas temperadas não sejam satisfatórios, comparativamente a outros autores, no geral, as deformações obtidas são relativamente mais baixas. Dinis-Almeida (2010), obteve para lajetas com 2% de emulsão (Procedimento B, ao ar) uma deformação média de 14,6 mm.

Os ensaios de resistência à fadiga realizaram-se em três níveis de extensão,  $200 \times 10^{-6}$ ,  $400 \times 10^{-6}$  e  $600 \times 10^{-6}$ , sendo a frequência de aplicação de carga de 10 Hz e a temperatura de 20 °C.

A mistura com 100% de material fresado da EN346 foi a que apresentou melhores resultados, obteve um maior número de ciclos para os vários níveis de extensão, obtendo valores  $\epsilon_6$  de 242  $\mu\text{m}$ . A mistura de referência obteve valor  $\epsilon_6$  de 202  $\mu\text{m}$ . Comparando os valores obtidos com os de outros autores, conclui-se que apresentam valores mais satisfatórios. Dinis-Almeida (2010), obteve valores de 195  $\mu\text{m}$  numa mistura com 100% de material fresado e 2% de emulsão. Conclui-se ainda, através dos resultados do comportamento à fadiga, no geral, que as misturas betuminosas recicladas temperadas não apresentam uma resistência inferior à das misturas betuminosas quente.

No último ensaio de desempenho realizado, sensibilidade à água, comparou-se a resistência à tração indireta de provetes acondicionados em ambientes diferentes: ao ar e em água. A resistência à tração indireta deverá ser superior a 80% para camadas de base e intermédias ou superior a 85% para camada de desgaste.

A análise dos valores obtidos no ensaio permite concluir que o índice de tração indireta (ITSR), em duas amostras foi inferior ao esperado, EN346 corrigida (54%) e A23 corrigida (75%), demonstrando que estas misturas apresentaram maior suscetibilidade à entrada de água. As restantes misturas apresentam valores superiores a 90%, indicando que as misturas apresentam pouca suscetibilidade à entrada de água.

O ensaio de sensibilidade à água revela falta de precisão na previsão do desempenho *in situ*. Atualmente, nenhum ensaio de sensibilidade à água foi validado totalmente.

É de salientar que a temperatura de compactação adequada (90 °C) é um aspeto importante na preparação dos provetes em laboratório, porque esta afeta a estrutura do agregado e a densidade da mistura compactada, que por sua vez afetam o desempenho da mistura betuminosa.

Com a realização do trabalho experimental, concluiu-se que as misturas que apresentaram melhores resultados ao nível da resistência à fadiga e à deformação permanente, foram as

misturas com 80% de material fresado da EN346 e 20% de agregados novos. Ao invés, das misturas com 100% de material fresado da A23 que apresentaram resultados menos favoráveis.

Em suma, verifica-se que foram cumpridos os objetivos definidos no âmbito de estudo. Concluiu-se que as misturas betuminosas recicladas temperadas têm um desempenho semelhante ao das misturas convencionais a quente, embora careçam de um cuidado acrescido na sua temperatura de produção e compactação.

Assim, face à necessidade de prolongar a vida útil do pavimento, conferindo-lhe simultaneamente características superficiais de superior qualidade, quer em conforto quer em segurança, o presente trabalho permitiu concluir que a técnica estudada, dispõe de uma metodologia de fácil aplicação em obra, que sendo bastante versátil em termos de formulação, permite ir ao encontro das necessidades de fazer face às solicitações e condições de exploração cada vez mais severas nas nossas estradas.

## **6.2 Trabalhos futuros**

Com o objetivo de aprofundar o conhecimento sobre as misturas betuminosas recicladas temperadas, indicam-se alguns pontos fundamentais importantes para trabalhos futuros.

A metodologia de formulação proposta neste estudo deveria ser aplicada em troços experimentais de forma a analisar e monitorizar o desempenho mecânico em serviço e a evolução das degradações dos pavimentos.

Estudar outro tipo de aplicações das misturas betuminosas recicladas temperadas, como por exemplo numa camada de desgaste.

Estudar a composição de uma mistura betuminosa reciclada temperada com a incorporação de uma pequena percentagem de cimento, na tentativa de melhorar o seu comportamento mecânico ao nível da deformação permanente, não comprometendo o comportamento de resistência à fadiga.

Recomenda-se o controlo preciso da temperatura nas diferentes fases de fabrico, compactação e colocação em obra (no caso de realização de troço experimental), visto que este fator influencia o comportamento mecânico das misturas betuminosas recicladas temperadas, nomeadamente, a resistência à deformação permanente, a rigidez e a resistência à fadiga.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**APAO** (2003) - Warm Mix Asphalt Shows Promise for Cost Reduction, Environmental Benefit, Centerline. The Asphalt Pavement Association of Oregon, Salem.

**Baptista, A. M. C.** (2006) - Misturas Betuminosas Recicladas a Quente em Central - Contribuição para o seu estudo e aplicação, Tese de Doutoramento em Engenharia Civil da F.C.T. da Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal, Dezembro.

**Barrão, L. C. S. P. C.** (2011) - Avaliação do comportamento de Misturas Betuminosas sob Temperaturas Elevadas, Tese de Doutoramento em Engenharia Civil da F.C.T. da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, Portugal, Setembro.

**Batista, F. A. B. A.** (2004) - Novas Técnicas de Reabilitação de Pavimentos - Misturas betuminosas densas a frio. Dissertação de Doutoramento em Engenharia Civil, Laboratório Nacional de Engenharia Civil e Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal.

**Batista, F. G. M. R.,** (2009) - Reabilitação de Pavimentos Flexíveis através de Reciclagem com cimento, Dissertação de Mestrado da Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, Outubro.

**Branco, F.; Pereira, P., Santos, L. P.** (2008) - Pavimentos Rodoviários, Edições Almedina, Coimbra, Portugal.

**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.

**Corrigan, M.** (2008) - Warm Mix Asphalt Technologies and Research, FHWA, (<http://www.fhwa.dot.gov/pavement/asphalt/wma.cfm>).

**D'Angelo, J., Harm, E., Bartoszek, J., Baumgardner, G., Corrigan, M., Cowsert, J., Harman, T., Jamshidi, M., Jones, W., Newcomb, D., Prowell, B., Sines, R. and Yeaton, B.** (2008) - Warm-Mix Asphalt, European Practice, Federal Highway Administration, U.S. DoT.

**David, D.** (2006) - Misturas Asfálticas recicladas a frio: Estudo em laboratório utilizando emulsão e agente de reciclagem emulsionado, Dissertação de Mestrado da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, Setembro.

**Dias, J. P. T.** (2009) - Influência do Envelhecimento na Resistência à Fadiga de Misturas Betuminosas, Dissertação de Mestrado do Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, Portugal.

Dinis-Almeida, M. S. F. (2010) - Caracterização e Formulação de Misturas Betuminosas Recicladas Temperadas em central, Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Universidade da Beira Interior, Covilhã, Portugal, Dezembro.

Estradas de Portugal, S.A. (2012) - Caderno de Encargos Tipo Obra - Pavimentação: Características dos materiais, Volume V, Capítulo 14.03, Portugal, Janeiro.

EAPA (2008) - *Asphalt in figures 2008*, European Asphalt Pavement Association, U.S. DoT.

EN 12591: 2009 - Bitumen and bituminous binders - Specifications for paving grade bitumens

EN 12697-6: 2003 - Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Parte 6: *Determination of bulk density of bituminous specimens.*

EN 12697-12: 2003 - *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 12: Determination of the water sensitivity of bituminous specimens.*

EN 12697-22: 2004 - Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 22: Wheel Tracking.

EN 12697-23: 2003 - *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 23: Determination of the indirect tensile strength of bituminous specimens.*

EN 12697-24: 2004 - *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 24: Resistance to fatigue.*

EN 12697-26:2004 - Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Parte 26: *Stiffness.*

EN 12697-29: 2002 - Determination of the dimensions of a bituminous specimen e EN 12697-6: *Determination of bulk density of bituminous specimens.*

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

EN 13108-20: 2006 - Bituminous mixtures - Material specifications -Parte 20: Type Testing.

EN 13808: 2005 - Bitumen and bituminous binders - Framework for specifying cationic bituminous emulsions.

Ferreira, C. I. G., (2009) - Avaliação do desempenho de misturas betuminosas temperadas. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil da Universidade do Minho, Portugal, Dezembro.

FHWA (2008) - Warm Mix Asphalt Technologies and Research - Federal Highway Administration, U.S. DoT.

**Fonseca, P.** (2002) - Reciclagem de Pavimentos Rodoviários. 6ª Semana das Engenharias, Instituto Politécnico de Bragança - Escola Superior de Tecnologia e Gestão, Abril.

**Freitas, E. F. e Pereira, P. A. A.** (2001) - Estudo da Evolução do Desempenho dos Pavimentos Rodoviários Flexíveis, Universidade do Minho, Número 11, pp 47-58.

**Gardete, D. C.** (2006) - Comparação de Ensaio Laboratoriais para a Caracterização de Misturas Betuminosas à Deformação Permanente, Tese de Mestrado da Universidade de Coimbra. Coimbra, Portugal.

**Prowell, B. D., Hurley, G. C.** (2005a) - Evaluation of Aspha-min® zeolite for use in warm mix asphalt, NCAT Report 05-04. National Center for Asphalt Technology, Auburn University, Auburn, Jun. (<http://www.eng.auburn.edu/files/centers/ncat/reports/2005/rep05-04.pdf>).

**Prowell, B. D., Hurley, G. C.** (2005b) - Evaluation of Sasobit® for use in Warm mix asphalt, National Center for Asphalt Technology.

**Prowell, B. D., Hurley, G. C.** (2006) - Evaluation of Potential Processes for use in Warm Mix, ([http://www.warmmix.net/submissions/10\\_20071127\\_Evaluation\\_of\\_Potential\\_Process.pdf](http://www.warmmix.net/submissions/10_20071127_Evaluation_of_Potential_Process.pdf))

**Prowell, B. D., Hurley, G. C.** (2008) - Warm Mix Asphalt: Best Practices, National Asphalt Pavement Association.

**InIR** - Instituto de Infra-Estruturas Rodoviárias, IP - Construção e Reabilitação de Pavimentos: Reciclagem de Pavimentos.

**Koenders, B. G.; Stoker, D. A.; Bowen, C., et al.** (2000) - Innovative processes in asphalt production and application to obtain lower operating temperatures, 2nd Eurasphalt & Eurobitume Congress, Barcelona, Spain, September.

**Kristjansdottir, O.** (2006). - Warm mix asphalt for cold weather paving, Dissertação de Mestrado em Engenharia da University of Washington, Department of Transportation, Olympia, Washington.

**Lopes, O. M. M.** (2009) - Misturas Betuminosas: Determinação das Características para o Cálculo dos Pavimentos, Dissertação de Mestrado da Universidade do Porto, Porto, Portugal.

**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.

**Minhoto, M. J. C.** (2005) - Consideração da Temperatura no Comportamento à Reflexão de Fendas do Reforços de Pavimentos Rodoviários Flexíveis, Tese de doutoramento da Escola de Engenharia da Universidade do Minho, Braga, Portugal, Agosto.

**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 Doutorado em Engenharia Civil, São Paulo, Brasil.

**NP 1097-2: 2000** - Ensaio para determinação das propriedades mecânicas e físicas dos agregados - Parte 2: Método de determinação da resistência à fragmentação.

**NP 933 - 1: 2000** - Ensaio das propriedades geométricas dos agregados - Parte 1: Análise granulométrica - Método de peneiração.

**NP EN 1097-6: 2003** - Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados - Parte 6: Determinação da massa volúmica e da absorção de água.

**NP EN 13108-1: 2011** - Misturas betuminosas - Especificações dos materiais - Parte 1: Betão betuminoso.

**NP EN 13108-8: 2011** - Misturas betuminosas - Especificações dos materiais - Parte 8: Misturas betuminosas recuperadas.

**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.

**Pereira, P., Picado-Santos, L. (2002)** - Pavimentos Rodoviários, Braga, Portugal.

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

**Picado-Santos, L. P. (2005)** - Formulação de Misturas Betuminosas a Quente, Sumário da Lição de Síntese da Agregação, Departamento de Engenharia Civil da F.C.T. da Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal, Dezembro.

**Silva, H. M. R. D. (2006)** - Caracterização da mástique betuminoso e da ligação agregado-mástique: Contribuição para o estudo do comportamento das misturas betuminosas, Tese de Doutorado da Escola de Engenharia da Universidade de Minho, Braga, Portugal.

**Torres, M. J. (2010)** - Ensaio de "imersão-compressão", "sensibilidade à água" e "gelo-degelo" em misturas betuminosas recicladas a semi-quente do pavimento da EN244, em Ponte de Sôr". CMADE - Centre of Materials and Building Technologies, Universidade da Beira Interior. Número 36. Covilhã. Portugal.

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