



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR
Engenharia

Resistência à Fadiga de Misturas Betuminosas com Betumes Temperados

Márcia Isabel Lopes Afonso

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

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

Covilhã, junho de 2014

A capacidade de persistir num rumo, seja ele popular ou não, mede-se em coragem. Quanto maior for a coragem, maior será a possibilidade de operarmos mudanças.

Mildred Pitts Walter, in “The Horn Book”

Agradecimentos

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

A concretização deste trabalho, só foi possível devido ao apoio, colaboração, dedicação e acompanhamento de várias pessoas e entidades, às quais expresso a minha gratidão:

Em especial, à minha orientadora Professora Doutora Marisa Sofia Fernandes Dinis de Almeida pelo apoio incondicional, constante incentivo e encorajamento, pelas orientações e conselhos, bem como pela ajuda e disponibilidade sempre presentes. Não esquecendo também a amizade e os momentos de boa disposição ao longo destes meses de trabalho intenso e também no decorrer destes cinco anos de curso.

À Universidade da Beira Interior, pelo contributo na minha formação e pelos meios e condições colocados à disposição na realização desta dissertação.

À CEPSA Portuguesa, na pessoa do Engenheiro Luís Vieira, pelos betumes fornecidos e pelo seu contributo na realização deste trabalho. À *Proas Betunes* CEPSA, na pessoa do Engenheiro Antonio García Siller, pela disponibilidade de análise do material fresado nos laboratórios em Madrid.

Ao colega Sérgio Patrício pela realização do ensaio Marshall e do ensaio de sensibilidade à água na sua empresa, InfraLab - Laboratório de Materiais de Construção Civil e Obras Públicas.

Aos assistentes técnicos, Sr. António Félix, Sr. Albino Alves e Sr. Luciano Rato, dos laboratórios do Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura da UBI, pelo precioso apoio prestado na execução do trabalho experimental e pelos momentos de humor.

Ao Professor Doutor Miguel Nepomuceno, pelas sugestões, ajuda e palavras de incentivo nestes últimos anos difíceis e trabalhosos e pela amizade presente ao longo deste percurso.

À minha colega Marta Duarte, pela ajuda mútua durante a realização do trabalho experimental, bem como pela amizade cultivada.

Às minhas queridas colegas e amigas Ana Torres, Patrícia Vale e Vânia Ferreira, pelo companheirismo, incentivo e ajuda durante estes cinco anos de verdadeira amizade na saudosa cidade da Covilhã.

Aos meus colegas de curso e amigos por me terem acompanhado ao longo do meu percurso académico, em especial aqueles que me ajudaram a chegar até aqui com um sorriso encorajador nos anos que passaram.

Em particular, ao meu pai Lino Afonso e à minha mãe Olga Lopes, pelos ensinamentos de vida que me transmitiram e por estarem sempre presentes na minha vida.

À minha família, em especial aos meus irmãos, Vânia Afonso e Tiago Afonso, e à minha tia Catarina Lopes, pelo encorajamento e ânimo nos momentos mais difíceis, pela ajuda que me deram para chegar até aqui e pelo apoio incondicional em todos os momentos ao longo da vida.

Resumo

As problemáticas ambientais que se têm levantado nos últimos anos conduzem a um maior cuidado com o meio ambiente. Para colmatar este facto surgiram, na indústria viária, as misturas betuminosas com betumes temperados que se encontram dentro de um conjunto de novas técnicas que estão a ser desenvolvidas para redução dos consumos, nomeadamente, a poupança de energia e a emissão de gases para a atmosfera, através da diminuição da temperatura de produção.

O principal objetivo desta dissertação é estudar o comportamento mecânico de misturas betuminosas produzidas com betumes temperados, com e sem incorporação de material fresado, ao nível da resistência à fadiga. Nestas misturas as temperaturas de produção são inferiores às das misturas betuminosas tradicionais a quente.

Esta dissertação inicia com um estado de arte, onde se abordam misturas betuminosas a quente, misturas betuminosas com betumes temperados e misturas com incorporação de material fresado (RAP - *Reclaimed Asphalt Pavement*), bem como os benefícios a nível social, ambiental e económico. Em seguida, faz-se uma breve abordagem à caracterização da resistência à fadiga de misturas betuminosas, expondo os ensaios mais utilizados. Posteriormente, apresenta-se a metodologia usada para a produção, em laboratório, das misturas betuminosas com diferentes teores de betume para a determinação do teor ótimo de ligante, através da realização de ensaios para a obtenção das propriedades fundamentais. Por último, são realizados ensaios de caracterização, nomeadamente, o ensaio de tração indireta em compressão diametral, o ensaio de sensibilidade à água e o ensaio de flexão em quatro pontos para avaliação da resistência à fadiga das misturas betuminosas. No final, apresentam-se as principais conclusões do estudo e propõem-se alguns trabalhos futuros no desenvolvimento deste.

Os resultados obtidos mostram que as misturas betuminosas com betumes temperados, com ou sem incorporação de material fresado, apresentam um comportamento mecânico à fadiga muito idêntico às misturas betuminosas a quente. Concluiu-se que as misturas betuminosas temperadas têm um desempenho similar às misturas tradicionais a quente, embora careçam de um cuidado acrescido na fase de produção e aplicação, nomeadamente, no controlo da temperatura de compactação.

Palavras-chave

Betume temperado; Resistência à fadiga; Material fresado; Misturas betuminosas

Abstract

The environmental issues that have been raised over recent years have led to greater concern with the environment. To address this fact the asphalt industry has developed warm mix-asphalt in the context of new technologies that are being developed to reduce energy consumption, in particular saving energy and decreasing gas emissions into the atmosphere, by lowering the mixing temperature.

The aim of this dissertation is to study the mechanical behaviour of warm-mix asphalt, with and without incorporation of reclaimed asphalt pavement, at the level of fatigue resistance. In these mixtures, the mixing temperatures are lower than those of the traditional hot-mix asphalt.

This dissertation begins with a state of art which addresses hot-mix asphalt, warm-mix asphalt and mixtures with incorporation of reclaimed asphalt pavement, as well as the associated social, environmental and economic benefits. Then, the fatigue resistance of asphalt mixtures is characterised, addressing the most used tests. Subsequently, the methodology used for mixing, in the laboratory, asphalt mixtures with different levels of bitumen content to determine the optimum binder content is presented, by conducting tests in order to obtain fundamental properties. Finally, characterisation tests are performed, namely the indirect tensile stiffness modulus test, the water sensitivity test, and the four point bending test in order to evaluate the fatigue resistance of the asphalt mixtures. In the end, the main conclusions of the study are presented and further research is suggested.

The obtained results show that the mechanical fatigue behaviour of warm-mix asphalt, with or without addition of reclaimed asphalt pavement, is very similar to hot-mix asphalt. It was concluded that warm-mix asphalt have a similar performance to traditional hot-mix asphalt, although they require extra care in mixing and placing, in particular, with regard to the control of the compaction temperature.

Keywords

Asphalt mixtures; Fatigue resistance; Reclaimed asphalt pavement; Warm-mix asphalt

Índice

Capítulo 1 - Introdução	1
1.1 Enquadramento.....	1
1.2 Objetivos	3
1.3 Organização do trabalho.....	3
Capítulo 2 - Estado de arte sobre misturas betuminosas com betumes temperados	5
2.1 Introdução.....	5
2.2 Temperatura de produção de misturas betuminosas	6
2.3 O desenvolvimento das misturas betuminosas temperadas	7
2.3.1 Experiências em obra.....	11
2.4 Técnicas de produção de misturas betuminosas com betumes temperados.....	13
2.4.1 Aditivos orgânicos	14
2.4.2 Aditivos químicos.....	14
2.4.3 Formação de espuma de betume	14
2.5 Incorporação de material fresado em misturas betuminosas	15
2.5.1 Técnicas de reciclagem de pavimentos	17
2.6 Benefícios da utilização das misturas betuminosas com betumes temperados	20
2.6.1 Benefícios sociais.....	20
2.6.2 Benefícios ambientais	21
2.6.3 Benefícios económicos	22
2.7 Inconvenientes da utilização das misturas betuminosas com betumes temperados	22
Capítulo 3 - Caracterização da resistência à fadiga das misturas betuminosas	25
3.1 Introdução.....	25
3.2 Resistência à fadiga de misturas betuminosas.....	26
3.2.1 Fendilhamento por fadiga	27
3.3 Fatores que influenciam a resistência à fadiga.....	29
3.4 Avaliação do comportamento à fadiga das misturas betuminosas	31
3.4.1 As leis de fadiga	33
3.5 Ensaios laboratoriais de caracterização da resistência à fadiga.....	34
3.5.1 Ensaio de flexão em dois pontos.....	36
3.5.2 Ensaio de flexão em três pontos.....	37
3.5.3 Ensaio de flexão em quatro pontos	37
3.5.4 Ensaio de tração indireta ou compressão diametral	41

Capítulo 4 - Estudo experimental	45
4.1 Introdução	45
4.2 Caracterização dos materiais utilizados	45
4.2.1 Agregados naturais	45
4.2.2 Ligantes betuminosos	46
4.2.3 Material fresado	47
4.2.4 Análise granulométrica	48
4.2.5 Massa volúmica e absorção de água	50
4.3 Determinação da composição das misturas betuminosas	52
4.3.1 Composição granulométrica das misturas betuminosas	52
4.3.2 Estimativa do teor de betume	53
4.3.3 Determinação do teor ótimo de betume	56
4.3.3.1 Baridade máxima teórica	56
4.3.3.2 Baridade, Porosidade, VMA e VFB	57
4.3.3.3 Ensaio <i>Marshall</i>	61
4.3.3.4 Escolha final do teor ótimo de betume	62
4.3.4 Ensaios de caracterização das misturas betuminosas	64
4.3.4.1 Ensaio de tração indireta em compressão diametral	64
4.3.4.2 Ensaio de sensibilidade à água	67
4.3.4.3 Ensaio de resistência à fadiga	70
 Capítulo 5 - Considerações finais	 79
5.1 Principais conclusões	79
5.2 Trabalhos futuros	81
 Referências Bibliográficas	 83
 Acerto Normativo	 91

Índice de Figuras

Figura 2.1 - Classificação das tecnologias de produção de misturas betuminosas em função da temperatura de produção, consumo de combustível e quantidade de emissões (Dinis-Almeida, 2010)	6
Figura 2.2 - Produção de material fresado na Europa (EAPA, 2013)	16
Figura 2.3 - Produção de misturas a quente e temperadas com incorporação de RAP (EAPA, 2013)	16
Figura 2.4 - Depósito de material proveniente de fresagem, EN244 (adaptado de Dinis-Almeida, 2010)	17
Figura 2.5 - Desenvolvimento sustentável (adaptado de D'Angelo et al., 2008)	20
Figura 3.1 - Fendilhamento por fadiga (adaptado de Antunes, 2005)	28
Figura 3.2 - Evolução do fendilhamento por fadiga (Covilhã)	29
Figura 3.3 - Limite da fadiga (<i>De La Roche</i> , 1996 citado por Otto, 2009)	29
Figura 3.4 - Evolução típica da tensão, extensão e módulo de rigidez, em ensaios de fadiga em extensão controlada e em tensão controlada (Baptista, 2006).....	32
Figura 3.5 - Geometria e fixação do provete trapezoidal (EN 12697-24)	37
Figura 3.6 - Equipamento para o ensaio 4PB-PR (DECA-UBI)	38
Figura 3.7 - Dimensões genéricas dos provetes prismáticos usados no ensaio 4PB-PR (adaptado de Miranda, 2008)	39
Figura 3.8 - Definição da rotura em ensaios de flexão em quatro pontos com extensão controlada (Ferreira, 2009)	40
Figura 3.9 - Princípios básicos do ensaio 4PB-PR (adaptado da EN 12697-24)	40
Figura 3.10 - Equipamento para o ensaio IT-CY (DECA-UBI).....	41
Figura 3.11 - Representação esquemática do equipamento para realização do ensaio IT-CY (adaptado da EN 12697-24)	42
Figura 3.12 - Esquema de carregamento e diagrama de tensões instaladas (Teixeira, 2000)	42
Figura 4.1 - Agregados naturais incorporados nas misturas betuminosas.....	46
Figura 4.2 - Material fresado do nó de Vila Velha de Ródão	47
Figura 4.3 - Método da incineração em mufla (DECA-UBI)	47
Figura 4.4 - Fuso II e curva granulométrica do material fresado antes da extração de betume	49
Figura 4.5 - Curvas granulométricas dos agregados	50
Figura 4.6 - Curvas granulométricas das misturas betuminosas	53

Figura 4.7 - Compactador de impacto (DECA-UBI).....	58
Figura 4.8 - Provetes cilíndricos produzidos	58
Figura 4.9 - Baridade saturada com superfície seca dos provetes cilíndricos.....	59
Figura 4.10 - Porosidade das misturas betuminosas	60
Figura 4.11 - VMA e VFB das misturas betuminosas	60
Figura 4.12 - Câmara de banho de imersão e prensa de compressão Marshall (InfraLab) ..	61
Figura 4.13 - Estabilidade e deformação do ensaio Marshall	62
Figura 4.14 - Ensaio de tração indireta em compressão diametral no NAT (DECA-UBI).....	65
Figura 4.15 - Representação esquemática do equipamento para realização do ensaio de tração indireta (adaptado da EN 12697-26).....	65
Figura 4.16 - Princípio de carregamento e deformação do provete no ensaio de tração indireta (Neves e Correia, 2006).....	66
Figura 4.17 - Provetes cilíndricos após ensaio de tração indireta em compressão diametral (DECA-UBI)	66
Figura 4.18 - Provetes do segundo grupo submetidos a vácuo em água e posteriormente em banho de água (DECA-UBI).....	68
Figura 4.19 - Ensaio de tração indireta em compressão diametral (InfraLab)	68
Figura 4.20 - Tipos de rotura (EN 12697-23)	70
Figura 4.21 - Provetes com roturas do tipo a) e b)	70
Figura 4.22 - Processo de fabrico das misturas betuminosas (DECA-UBI).....	71
Figura 4.23 - Compactação das lajetas com o cilindro de rolos (DECA-UBI)	71
Figura 4.24 - Serragem de lajeta e provetes prismáticos de ensaio (DECA-UBI)	72
Figura 4.25 - Procedimento para o cálculo da baridade (DECA-UBI)	72
Figura 4.26 - Colocação de provete prismático no equipamento (DECA-UBI).....	73
Figura 4.27 - Leis de fadiga de provetes prismáticos moldados em laboratório.....	75

Índice de Quadros

Quadro 2.1 - Temperaturas orientativas para utilização de betumes temperados (Cepsa, 2010a)	11
Quadro 2.2 - Resultados dos ensaios às misturas na Estrada GI 4141 (Carvalho e Barreno, 2013).....	12
Quadro 2.3 - Grau de compactação das misturas da Estrada N 420 (Carvalho e Barreno, 2013)	12
Quadro 2.4 - Resultados do ensaio Marshall às misturas da Estrada CL 612 (Carvalho e Barreno, 2013).....	13
Quadro 2.5 - Tipos de reciclagem (Antunes e Batista, 2009)	18
Quadro 3.1 - Principais tipos de ensaios de caracterização da resistência à fadiga (Batista, 2006).....	36
Quadro 3.2 - Dimensões mínimas do provete (adaptado da EN 12697-24)	37
Quadro 4.1 - Características dos betumes asfálticos (Cepsa).....	46
Quadro 4.2 - Teor de betume envelhecido do material fresado (média de 7 amostras)....	48
Quadro 4.3 - Caracterização do betume envelhecido do material fresado (<i>Proas Betunes</i> Cepsa)	48
Quadro 4.4 - Análise granulométrica dos agregados.....	50
Quadro 4.5 - Massa volúmica e absorção de água dos agregados	51
Quadro 4.6 - Designação e descrição das misturas betuminosas produzidas em laboratório	52
Quadro 4.7 - Granulometria das misturas betuminosas produzidas em laboratório	52
Quadro 4.8 - Composição das três misturas betuminosas (% de agregado)	53
Quadro 4.9 - Percentagens de betume a adicionar às misturas	54
Quadro 4.10 - Resultados do estudo de penetração do ligante final da mistura MT30.....	55
Quadro 4.11 - Baridade máxima teórica das misturas betuminosas	57
Quadro 4.12 - Requisitos para as características da mistura betuminosa a quente	63
Quadro 4.13 - Resultados das características analisadas	63
Quadro 4.14 - Resultados do ensaio de tração indireta em compressão diametral	67
Quadro 4.15 - Baridade média dos grupos de provetes	67
Quadro 4.16 - Resultados do ensaio de sensibilidade à água	69
Quadro 4.17 - Resultados da baridade e da porosidade dos provetes prismáticos (média de 12 vigas)	72
Quadro 4.18 - Resultados dos ensaios de resistência à fadiga	75
Quadro 4.19 - Coeficientes obtidos para as leis de fadiga	76

Lista de Acrónimos

AAPA	Australian Asphalt Pavement Association
AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
AEMA	Asphalt Emulsion Manufacturers Association
CALTRANS	California Department of Transportation
DECA	Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura
EAPA	European Asphalt Pavement Association
EUA	Estados Unidos da América
FHWA	Federal Highway Administration
NAPA	National Asphalt Pavement Association
UBI	Universidade da Beira Interior
UCPRC	University of California Pavement Research Center
UNFCCC	Convenção Básica das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas
WRAP	Waste and Research Action Program
2PB-PR	Two-point bending test on prismatic shaped specimens
2PB-TR	Two-point bending test on trapezoidal shaped specimens
3PB-PR	Three-point bending test on prismatic shaped specimens
4PB-PR	Four-point bending test on prismatic shaped specimens
A	Absorção de água dos agregados
a, b	Coefficientes determinados experimentalmente
AC	Asphalt Concrete
b	Largura
BBTM B	Misturas descontínuas para camadas de desgaste tipo B
BMP	Betume modificado com polímeros
BT	Betume Temperado
CE	European Commission
CO	Monóxido de carbono
CO ₂	Dióxido de carbono
COV	Compostos orgânicos voláteis
D	Mistura densa
EN	European Standard
EP	Estradas de Portugal
h	Altura
IT-CY	Indirect tensile test on cylindrical shaped specimens
ITS	Indirect Tensile Strength

ITSR	Indirect Tensile Strength Ratio
L	Comprimento efetivo
L_{tot}	Comprimento total do provete
LVDT	Linear Variable Displacement Transducer
MT	Mistura betuminosa com betume temperado
MT30	Mistura betuminosa com betume temperado e incorporação de 30 % de material fresado
MQ	Mistura betuminosa a quente
N	Número de aplicações de carga até à rotura
N_{100}	Resistência à fadiga para uma extensão de tração de 100×10^{-6}
NAT	Nothingham Asphalt Tester
NO_x	Óxido de azoto
NP	Norma Portuguesa
Pb_{MBF}	Percentagem de betume envelhecido da mistura betuminosa fresada
Pb_N	Percentagem de betume novo em relação à massa total da mistura
Pb_R	Estimativa da percentagem de betume em relação à massa total da mistura
PG-3	Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes
R^2	Coeficientes de correlação
RAP	Reclaimed Asphalt Pavement
SO_2	Dióxido de enxofre
TR	Taxa de reciclagem
TRb	Taxa de reciclagem de betume
VFB	Vazios nos agregados cheios de betume
V_m	Porosidade da mistura
VMA	Vazios na mistura de agregados
ϵ_6	Extensão de tração necessária para provocar a rotura por fadiga ao fim de 10^6 ciclos
ϵ_t	Extensão de tração (10^{-6})
ρ	Massa volúmica do agregado
ρ_{bssd}	Baridade saturada com superfície seca do provete
ρ_{mc}	Baridade máxima teórica da mistura betuminosa
ρ_w	Massa volúmica da água à temperatura de ensaio

Capítulo 1 - Introdução

1.1 Enquadramento

Um dos principais desafios que a sociedade enfrenta nos dias de hoje são as preocupações com o meio ambiente, sendo um dos objetivos mais procurado a diminuição do consumo de combustíveis fósseis e das emissões de gases de efeito de estufa (Carvalho e Barreno, 2013). A entrada do Protocolo de Quioto em 2005, agora prolongado até 2020, tem como objetivo que os países signatários assumam o compromisso de reduzir as emissões de gases para a atmosfera.

A produção de misturas betuminosas convencionais (misturas betuminosas a quente) é responsável por um grande consumo de energia, que é produzida pela queima de combustível fóssil e consequente emissão de gases poluentes. A fase de produção dos materiais de construção rodoviária, no ciclo de vida de um pavimento, é causadora deste facto, nomeadamente na secagem e aquecimento dos agregados no tambor secador, com temperaturas acima dos 140 °C, na manutenção da temperatura dos agregados e do ligante para a execução da mistura (Park *et al.*, 2003).

Neste sentido, surge a necessidade de tomar medidas, desenvolvendo novas técnicas no fabrico das misturas convencionais, sendo a diminuição das temperaturas de fabrico de misturas betuminosas um contributo importante para um menor consumo de energia e redução das emissões (Ferreira, 2009; Neves *et al.*, 2013; Pais, 2013).

A utilização das misturas betuminosas temperadas potencia vantagens devidas ao menor consumo de energia necessária para o seu fabrico, implicando reduções de 30 a 40 % de emissões de dióxido de carbono (CO₂) e dióxido de enxofre (SO₂), 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_x) e de 20 a 25 % para as poeiras (D'Angelo *et al.*, 2008).

Argumentos a favor das referidas misturas são também os aspetos económicos, relativos à redução de cerca de 35 % do combustível gasto no aquecimento dos queimadores. Por outro lado, garantem as baridades das misturas desejadas, devido à redução da temperatura de fabrico, aplicação e compactação. Possibilitam ainda um ambiente de trabalho muito mais confortável, garantido pela redução de 30 a 50 % da exposição de fumos e compostos hidrocarbonatados, por parte dos trabalhadores das centrais betuminosas e das equipas de pavimentação (AAPA, 2001; D'Angelo *et al.*, 2008).

A redução de emissões permite que as centrais de fabrico de misturas betuminosas temperadas se situem mais próximas das zonas urbanas e a produção das mesmas possibilita o transporte a maiores distâncias e menor preocupação com o período de pavimentação, pois a sua aplicação pode ser realizada a temperaturas mais baixas que as convencionais (Capitão *et al.*, 2012). A utilização destas misturas também traduz um menor envelhecimento do ligante.

Por outro lado, para além de se pretender diminuir a temperatura na produção das misturas betuminosas, também se pretende que estas sejam reutilizáveis. Os recursos que constituem as misturas, agregados e ligantes, são naturais e portanto limitados. Neste sentido, surge o conceito de RAP, do inglês *Reclaimed Asphalt Pavement*, que se define como a recuperação do material num pavimento, designado de fresado. Há mais de 30 anos, que muitos países europeus usam material fresado como uma prática comum, no entanto ainda se verifica que em vários países não existe praticamente reutilização nenhuma. Na Europa, todos os anos são produzidos cerca de 50 milhões de toneladas de material fresado, podendo ser reutilizadas na produção novas misturas betuminosas (EAPA, 2013). Em Portugal, a maioria do material fresado é depositado em vazadouros sem ter qualquer outra utilização, pois na construção de novos pavimentos ou na sua reabilitação aplicam-se misturas betuminosas a quente com recurso a agregados naturais.

As preocupações ambientais são o motivo de diversas entidades para estimular a utilização de misturas betuminosas temperadas e das mesmas com incorporação de material fresado, por isso têm sido realizados estudos para verificar o desempenho destas misturas em pavimentos flexíveis (Abreu *et al.*, 2013; Sengoz and Oylumluoglu, 2013; Silva *et al.*, 2012; Dinis-Almeida *et al.*, 2012b), nomeadamente a resistência à fadiga, objeto de estudo nesta dissertação. Os processos relacionados com o fenómeno de fadiga das misturas betuminosas são já há alguns anos, objeto de muita pesquisa e investigação em todo o mundo e principalmente na Europa, Estados Unidos da América e na Austrália. Através destes estudos tem-se concluído que a fadiga é a causadora do fendilhamento dos pavimentos betuminosos, pois representa a capacidade que este material tem de responder à aplicação repetida de cargas provenientes do tráfego, para determinadas condições ambientais e de velocidade (Teixeira, 2000).

Perante este contexto e devido às crescentes exigências, por parte dos utilizadores da rede rodoviária, quanto ao nível de segurança e de conforto de condução, assim como da aplicabilidade dos dinheiros públicos, considerou-se oportuno neste trabalho avaliar as misturas betuminosas com betumes temperados e as mesmas com incorporação de material fresado quanto à sua resistência à fadiga, com o intuito de desenvolver mais o conhecimento acerca deste tema, e contribuindo para que a sua aplicação seja mais significativa nos pavimentos.

1.2 Objetivos

O objetivo de desenvolvimento desta dissertação é a análise do desempenho à fadiga das misturas betuminosas com betumes temperados comparativamente com as misturas betuminosas convencionais.

Neste sentido, este trabalho tem como objetivo principal estudar o comportamento mecânico de misturas betuminosas com betumes temperados, ao nível da resistência à fadiga, através do ensaio de flexão em quatro pontos, de acordo com a norma EN 12697-24:2004. As misturas fabricadas serão misturas betuminosas com betumes temperados e misturas betuminosas com betumes temperados e material fresado, produzidas a temperaturas mais baixas que a mistura betuminosa a quente, tida como referência nesta investigação, para comprovar o bom desempenho das misturas em estudo.

Experimentalmente, o trabalho elaborado em laboratório consistirá na avaliação da resistência à fadiga por meio do ensaio de flexão em quatro pontos e também na caracterização das misturas produzidas, já referidas, através da obtenção das propriedades fundamentais, baridade e porosidade, módulo de rigidez e ensaio de sensibilidade à água.

De forma a perceber a coerência de resultados com outras investigações, será realizada uma comparação dos resultados obtidos, com estudos anteriormente realizados com as mesmas condições simuladas em laboratório.

1.3 Organização do trabalho

Para atingir os objetivos do presente estudo é necessário definir um conjunto de métodos que auxiliem nesse sentido. Para tal, recorreu-se a uma pesquisa bibliográfica aprofundada definindo desta forma o estado de arte e a caracterização da resistência à fadiga das misturas betuminosas. Posteriormente, segue-se a parte experimental que se baseia na caracterização das misturas betuminosas e na execução de provetes para realização do ensaio de resistência à fadiga.

Este trabalho está dividido em cinco capítulos, que a seguir são descritos para uma melhor compreensão das matérias abordadas.

Capítulo 1: “Introdução”. No primeiro capítulo é introduzido o tema em análise, resistência à fadiga de misturas betuminosas com betumes temperados, fazendo um enquadramento, apresentando os objetivos e indicando como está organizado o trabalho.

Capítulo 2: “Estado de arte sobre misturas betuminosas com betumes temperados”. No capítulo 2 é relatado o estado de arte sobre misturas betuminosas com betumes temperados,

contemplando a temperatura de produção, o seu desenvolvimento, as técnicas de produção, a incorporação de material fresado, os benefícios e os inconvenientes.

Capítulo 3: “Caracterização da resistência à fadiga das misturas betuminosas”. O capítulo 3 aborda a caracterização da resistência à fadiga incluindo os fatores que influenciam o fenómeno da fadiga e como é realizada a avaliação do desempenho das misturas betuminosas a esta característica, descrevendo por fim os ensaios mais usuais que caracterizam o comportamento à fadiga, incluindo o ensaio utilizado neste estudo.

Capítulo 4: “Estudo experimental”. O capítulo 4 integra a caracterização dos materiais usados e a determinação da composição das misturas através do ensaio de compressão *Marshall*, abrangendo a realização de ensaios para a obtenção das propriedades fundamentais como a baridade e porosidade. É neste capítulo que são realizados os ensaios laboratoriais de caracterização das misturas betuminosas através do ensaio de tração indireta em compressão diametral, do ensaio de sensibilidade à água e do próprio ensaio de resistência à fadiga através da execução do ensaio de flexão em quatro pontos.

Capítulo 5: “Considerações finais”. O último capítulo apresenta as principais conclusões obtidas no estudo, no que se refere à resistência à fadiga das misturas betuminosas com betumes temperados e das mesmas com incorporação de material fresado, e propõe trabalhos futuros.

Capítulo 2 - Estado de arte sobre misturas betuminosas com betumes temperados

2.1 Introdução

As misturas betuminosas têm um papel fundamental na execução das várias camadas de pavimentos rodoviários, uma vez que constituem o principal material usado, não só em Portugal, como em todo o mundo.

Perante o agravamento do consumo de combustíveis fósseis, dos níveis de CO₂ produzidos no mundo e do conceito de sustentabilidade, muito comentado nos dias de hoje, o sector rodoviário tem vindo a desenvolver cada vez mais esforços, no sentido de diminuir os impactos ambientais das tecnologias utilizadas na produção de misturas betuminosas e de melhorar os desempenhos destas misturas. Deste empenho, tem surgido o desenvolvimento de novas tecnologias no âmbito da pavimentação, onde se enquadra o aparecimento das misturas betuminosas temperadas.

Desde a década de 90, que se têm efetuado estudos com misturas betuminosas temperadas (Prowell *et al.*, 2008). A produção destas misturas dá-se com temperaturas entre os 110 e os 140 °C, permitindo reduções de cerca de 40 °C relativamente às misturas betuminosas a quente (Capitão *et al.*, 2012; Carvalho e Barreno, 2013; EAPA, 2010). A redução da temperatura de produção e aplicação está na origem dos vários benefícios e inconvenientes da utilização das misturas betuminosas temperadas, como se poderá ver mais à frente.

No âmbito da construção rodoviária é através da redução das temperaturas elevadas, usadas na produção das misturas betuminosas, que se conseguem maiores poupanças de energia. Nos dias de hoje, existem no mercado diversas soluções técnicas que possibilitam atingir esse novo conceito (Nynas, 2009).

Um dos grandes fios condutores para a redução dos níveis de CO₂ e gases com efeito de estufa, de forma a combater o aquecimento global, é o Protocolo de Quioto, que teve início em Dezembro de 1997 em Quioto, na terceira sessão da Convenção Básica das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (UNFCCC). Este protocolo tinha em vista atingir as suas metas até 2012, sendo que esse mesmo ano sofreu uma extensão até 2020.

O conceito de desenvolvimento sustentável define-se como um modelo de desenvolvimento global que integra aspetos não só ambientais, mas também sociais e económicos. Dentro deste

conceito podem englobar-se a redução das emissões e a possibilidade de incorporação de misturas betuminosas recuperadas (*Reclaimed Asphalt*), de forma economicamente vantajosa e sem comprometer o futuro das gerações (Ferreira, 2009). Diversas associações e agências governamentais na Europa adotaram o conceito de desenvolvimento sustentável, sendo as misturas betuminosas temperadas e a tecnologia da sua produção consistentes com este conceito (D'Angelo *et al.*, 2008; EAPA and NAPA, 2009).

No decorrer deste capítulo serão apresentadas as temáticas com maior ênfase nas misturas betuminosas com betumes temperados, tal como a sua temperatura de produção, o seu desenvolvimento, técnicas de produção, incorporação de material fresado, benefícios e inconvenientes.

2.2 Temperatura de produção de misturas betuminosas

A constante pressão que o sector rodoviário tem vindo a sofrer, para redução dos níveis de CO₂ e da utilização dos combustíveis fósseis, reflete-se através do Protocolo de Quioto, que entre 2008 e 2012 pretendia reduzir as emissões de CO₂ em 5 %. Como efeito favorável a este objetivo, conclui-se que a redução das temperaturas de produção e de pavimentação das misturas betuminosas resulta em menores emissões (EAPA, 2005).

Uma das formas que existe para classificar as misturas betuminosas é de acordo com a divisão relativamente ao intervalo de temperaturas a que são produzidas, como se pode observar na Figura 2.1.

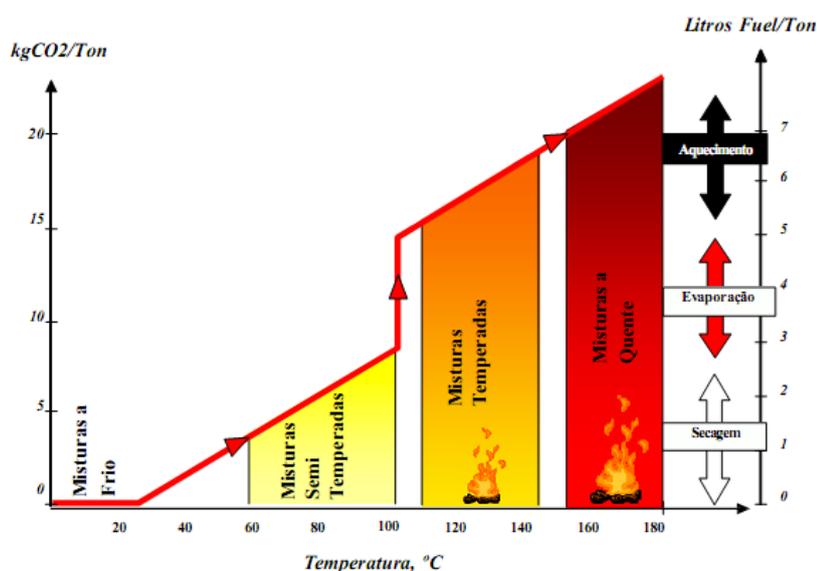


Figura 2.1 - Classificação das tecnologias de produção de misturas betuminosas em função da temperatura de produção, consumo de combustível e quantidade de emissões (Dinis-Almeida, 2010)

As misturas a frio são produzidas à temperatura ambiente e sem recorrer ao aquecimento dos agregados, e utiliza emulsões betuminosas ou espuma de betume como tecnologia base (EAPA, 2010).

A temperatura de produção das misturas semi-temperadas situa-se abaixo da linha de evaporação da água (100 °C), em que os agregados são aquecidos a uma temperatura de mistura entre os 60 e os 100 °C, aproximadamente. A energia consumida é menor do que nas misturas a quente, porque os agregados grossos não estão totalmente secos e a sua humidade é aproveitada para melhorar o processo de mistura, através do aumento do volume por parte da água, aquando o aquecimento da mistura, facilitando o envolvimento dos agregados com o betume (Alconada, 2011). Nas misturas semi-temperadas pode usar-se a emulsão betuminosa ou espuma de betume, para uma redução da viscosidade do ligante através de emulsionamento ou através da formação de espuma, respetivamente. (Dinis-Almeida, 2010).

As misturas temperadas produzem-se com temperaturas entre os 110 e os 140 °C, aproximadamente. A tecnologia de base utilizada envolve o uso de aditivos químicos, aditivos orgânicos e técnicas de formação de espuma, com a finalidade de reduzir a viscosidade do ligante através de modificação reológica (Dinis-Almeida, 2010). Estas misturas têm propriedades e desempenho equivalentes às misturas convencionais a quente (EAPA, 2010).

Por último, as misturas convencionais a quente produzem-se entre os 150 e os 180 °C, aproximadamente, em que a temperatura de produção depende do betume utilizado. Usualmente, utiliza-se betume convencional ou betume modificado com polímeros ou com borracha (Dinis-Almeida, 2010). As misturas convencionais pertencem a este tipo de misturas, nas quais o gasto de energia e as emissões de gases para a atmosfera não são controlados (Alconada, 2011).

De acordo com Nynas (2009), a redução da temperatura de produção e aplicação e o aumento de materiais reciclados nas misturas betuminosas proporcionam benefícios claros para a sustentabilidade a curto, médio e longo prazo.

A presente dissertação vai incidir sobre as misturas betuminosas com betumes temperados, procurando reforçar que estas, apesar de serem produzidas a temperaturas inferiores às misturas convencionais, apresentam um desempenho idêntico, motivando para o uso mais corrente das mesmas.

2.3 O desenvolvimento das misturas betuminosas temperadas

Ao contrário do que se possa pensar, as misturas betuminosas produzidas a temperaturas mais baixas que as convencionais não são um conceito novo. Em 1956, o Professor Ladis Csanyi, da Universidade do Iowa, percebeu o potencial da espuma de betume como um ligante para solos.

A partir desta época, esta tecnologia que permite a redução da temperatura de produção das misturas betuminosas, tem sido utilizada com muito sucesso em vários países (Chowdhury and Button, 2008).

O processo desenvolvido por Csanyi consistia na injeção de vapor de água no betume aquecido para reduzir a temperatura de produção (Al-Rawashdeh, 2008), mas em 1968 a Mobil Oil, na Austrália, apresentou a descoberta de Csanyi e alterou o método original, substituindo a injeção de vapor de água por água fria, tornando mais rápido o processo de produção da espuma de betume (Kristjánsdóttir *et al.*, 2007).

A Chevron, na década de 70, desenvolveu critérios de dimensionamento e formulação para pavimentos em misturas betuminosas estabilizadas com emulsões, através da publicação do manual “*Bitumuls Mix Manual*”, em 1977, que continha informação importante sobre a metodologia de formulação e produção destas misturas (Chowdhury and Button, 2008).

Foram publicados manuais análogos, em 1979 e 1981, respetivamente, pela *Federal Highway Administration* (FHWA) e *Asphalt Emulsion Manufacturers Association* (AEMA), resultando num unânime consenso na utilização deste tipo de misturas, nomeadamente para uso em meios onde existem restrições nas emissões, assim como para zonas com baixos níveis de tráfego (FHWA, 1979; AEMA, 1981).

Chowdhury e Button (2008) citam Kuennen (2004), que menciona que as misturas com emulsão betuminosa eram populares em zonas rurais onde a distância às centrais de misturas a quente e o reduzido volume de tráfego podiam impedir o uso das convencionais misturas a quente. Sabe-se que as centrais de misturas betuminosas a frio podem estar situadas em qualquer lugar, uma vez que a emissão de gases prejudiciais por parte destas é inexistente, comparativamente a uma central de misturas betuminosas a quente.

Em 1995, Maccarone, Holleran e Ky estudaram as misturas betuminosas a frio com espuma de betume como ligante e também com elevados conteúdos de emulsão, concluindo que estas misturas representavam um ganho na construção de estradas devido à eficiência energética e às baixas emissões.

As primeiras vias rodoviárias construídas na Europa com misturas betuminosas temperadas correspondem ao ano de 1995. Iniciaram-se na Alemanha com a adição de um zeólito sintético (Aspha-Min®), seguindo-se esta aplicação das misturas na Noruega e na Dinamarca (Prowell and Hurley, 2008). Ainda em 1995, a *Shell Bitumen* apresenta a técnica WMA-Foam®, que resultou de uma investigação inovadora, baseada no conceito da técnica de misturas de dois componentes dos betumes moles e duros. Em 1997, começa a ser comercializado na Europa um aditivo orgânico, denominado de Sasobit®, como auxiliar na compactação das misturas, que

desde então tem crescido consideravelmente na produção de misturas betuminosas temperadas (Chowdhury and Button, 2008).

Jenkins e os seus colaboradores, em 1999, introduziram um novo processo na produção de misturas betuminosas semi-temperadas com espuma de betume, consistindo em avaliar os benefícios de aquecer os agregados a temperaturas ligeiramente acima da temperatura ambiente, mas abaixo dos 100 °C, antes da introdução da espuma de betume. Este novo método reforça o envolvimento das partículas, a coesão, a resistência à tração e a compactação, sendo especialmente favorável no caso de misturas que incluam elevados conteúdos de RAP ou misturas densas com agregados britados (Chowdhury and Button, 2008). A Europa, a África do Sul e a Austrália têm investigado os benefícios e o desempenho das misturas betuminosas temperadas, muito possivelmente devido ao custo e escassez dos combustíveis fósseis (Koenders *et al.*, 2002).

Com vista à análise e estudo das misturas betuminosas temperadas, em 2002 a *National Asphalt Pavement Association* (NAPA) lidera uma visita pela Europa. A partir dessa altura, também nos Estados Unidos da América (EUA) surgiu o interesse e desenvolvimento desta tecnologia, progredindo de forma exponencial, de tal forma que a FHWA aponta as misturas betuminosas temperadas como uma área atrativa e organiza, com a NAPA, em 2003, uma conferência cuja finalidade é explorar o seu potencial de utilização nos EUA (Ferreira, 2009).

No “*World of Asphalt*”, em 2004, são apresentados projetos e desenvolvimentos na área das misturas betuminosas temperadas, por parte de diversas entidades rodoviárias. Tendo em conta o interesse na tecnologia, quer por parte dos EUA quer da Europa, continuou-se a estudar o tema, avaliando as vantagens de produção das misturas betuminosas temperadas (Ferreira, 2009).

Em 2007, realizou-se uma parceria entre *California Department of Transportation* (CALTRANS) e *University of California Pavement Research Center* (UCPRC) para avaliar se as misturas betuminosas temperadas teriam um desempenho igual ou melhor que as misturas convencionais a quente, para além da avaliação de possíveis problemas relacionados com a baixa temperatura de compactação e de sensibilidade à água do pavimento. O trabalho do mesmo grupo de entidades residiu em realizar vários ensaios de laboratório de forma a avaliar problemas de curto, médio e longo prazo. O estudo resultou na descoberta de um maior conforto dos trabalhadores devido à menor temperatura de produção e menor emissão de fumos, mostrando também que este tipo de misturas não apresentou perdas nas propriedades analisadas, sendo a sua utilização promissora (Jones, 2009 citado por Budny, 2012).

No mês de maio de 2007, um grupo de investigadores americanos visitou quatro países Europeus - Bélgica, França, Alemanha e Noruega - com o objetivo de analisarem e debaterem as

diferentes tecnologias utilizadas na redução da temperatura das misturas betuminosas na Europa e nos EUA, com especial interesse pelo comportamento dos pavimentos a longo prazo e pelos benefícios destas misturas (D'Angelo *et al.*, 2008). Estes investigadores representaram a agência governamental *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO) e os consultores privados da FHWA.

Do trabalho realizado pelos investigadores resultaram alguns desafios e conclusões, onde se desenvolveram uma série de recomendações futuras para implementar as misturas betuminosas temperadas nos Estados Unidos.

Os seis desafios apresentados propõem: 1. Verificar se o desempenho global das misturas temperadas é tão bom como o das misturas a quente; 2. Analisar a aprovação inicial do produto; 3. Abordar detalhadamente as questões que proíbem o uso de misturas betuminosas temperadas; 4. Adaptar as tecnologias e produtos usados nas misturas betuminosas temperadas com baixa produção, assim como as centrais betuminosas na Europa, para centrais com produção superior às usadas nos Estados Unidos; 5. Os agregados grossos devem ser devidamente secos; 6. Cada empreiteiro deve, individualmente, adotar os produtos e as tecnologias que mais beneficiam estas misturas, perante a vasta gama de aplicações (D'Angelo *et al.*, 2008).

As recomendações enunciadas pelos investigadores são as seguintes: as misturas betuminosas temperadas devem ser uma alternativa aceitável, desde que as mesmas atendam às especificações aplicáveis às misturas a quente; deve ser desenvolvido um sistema de aprovação para as misturas betuminosas temperadas; recomenda-se que as equipas de investigação forneçam as informações conseguidas acerca das novas tecnologias, através de apresentações, artigos e relatórios; devem implementar-se melhores práticas para a produção, manuseio e armazenamento dos agregados; é necessário realizar mais ensaios de campo em estradas com maior tráfego e pavimentadas com as misturas betuminosas temperadas; os fatores que afetam a viabilidade económica destas misturas precisam de ser identificados e controlados (D'Angelo *et al.*, 2008).

Recentemente, Carvalho e Barreno (2013) publicaram um estudo, desenvolvido pela CEPISA, em que apresentam algumas experiências em obra realizadas em Espanha com betume temperado, tendo surgido resultados bastante satisfatórios, mesmo quando as condições atmosféricas eram desfavoráveis.

Na seguinte subsecção, apresentam-se as obras do estudo mencionado, uma vez que esta dissertação trata de misturas betuminosas com betumes temperados, e os resultados obtidos nas mesmas vão servir como termo de análise e comparação com as misturas produzidas em laboratório, aquando da determinação das características fundamentais.

2.3.1 Experiências em obra

A CEPESA considera as misturas temperadas como as que mais importância têm tido na inovação dos ligantes, uma vez que estas utilizam betumes com propriedades específicas que possibilitam a produção de misturas a temperaturas inferiores às habituais. O fabrico e o espalhamento, na produção de misturas betuminosas com betumes temperados, são realizados de forma exatamente igual às misturas a quente reduzindo, no entanto, a temperatura de aquecimento dos agregados até 40 °C sem que as misturas percam as suas propriedades mecânicas, tornando-se misturas de baixo consumo de combustível e de baixas emissões (Carvalho e Barreno, 2013).

Os betumes de baixa temperatura que a CEPESA inclui na gama de betumes convencionais são o Betume BT 35/50 e o Betume BT 50/70, que são reconhecidos pelas suas propriedades reológicas e temperaturas de trabalho e de bombeio semelhantes às dos betumes convencionais 35/50 e 50/70, reduzindo assim as temperaturas de fabrico das misturas, como se pode ver no Quadro 2.1, em função do seu tipo e das suas características (CEPSA, 2010a).

Quadro 2.1 - Temperaturas orientativas para utilização de betumes temperados (CEPSA, 2010a)

	Betume BT 35/50	Betume BT 50/70
T ligante	155 °C - 160 °C	150 °C - 160 °C
T agregados	> 125 °C	> 125 °C
T mistura	> 125 °C	> 125 °C
T compactação	> 115 °C	> 115 °C

A primeira experiência em obra apresentada é referente à Estrada GI 4141 (Asteasu, Guipúzcoa), onde foi efetuado um espalhamento de uma mistura AC 16 Surf com 5,2 % de betume convencional BT (Betume Temperado) e as temperaturas de fabrico situaram-se entre os 130 e os 140 °C, baixando a temperatura de compactação até aos 120 °C. Durante a aplicação da mistura temperada, as condições meteorológicas foram mais desfavoráveis, com bastante vento e chuva, que as verificadas para as misturas convencionais. O Quadro 2.2 apresenta os resultados dos diversos testes realizados, para ambas as misturas.

O segundo caso foi na Estrada N 420 (Gandesa, Tarragona), em que a obra consistia na reparação da travessia de Gandesa com fresado e reposição. Realizou-se o espalhamento de uma mistura AC 22 Surf D com 4,8 % de betume BT e as temperaturas de fabrico estiveram entre os 130 e os 140 °C, com a temperatura de compactação a baixar até aos 110 °C. As condições meteorológicas foram desfavoráveis com vento e temperaturas abaixo dos 10 °C.

Quadro 2.2 - Resultados dos ensaios às misturas na Estrada GI 4141 (Carvalho e Barreno, 2013)

Propriedade	Unidade	Betume BT 50/70	Betume 50/70
Baridade aparente da amostra	g/cm ³	2,315	2,332
Baridade aparente em central	g/cm ³	2,397	2,364
Compactação*	%	96,6	98,6
Estabilidade <i>Marshall</i>	kN	9,4	9,9
Pista de laboratório			
V _[105-120 min]	10 ⁻³ mm/min	2,4	1,3
Módulo dinâmico (20° a 10 HZ)			
Módulo	MPa	6449	5572
Angulo de fase	°	18,2	16,8
Fadiga em deformação			
ε ₆ extensão de tração (10 ⁻⁶)	-	134	113
R ²	-	0,90	0,89

*Torna-se como referência a baridade de *Marshall*

Os resultados finais da segunda experiência demonstraram uma boa trabalhabilidade das misturas, conseguindo sem dificuldade a compactação requerida. O grau de compactação para as diferentes misturas, em comparação com a mistura convencional a quente, é apresentado no Quadro 2.3, verificando-se que a mistura temperada, compactada a 135 °C chega a um valor de compactação de 99,5 % que vai baixando conforme se reduz a temperatura de compactação.

Quadro 2.3 - Grau de compactação das misturas da Estrada N 420 (Carvalho e Barreno, 2013)

	T Comp. [°C]	Baridade aparente [g/cm ³]	Compactação [%]
B 35/50	150	2,450	100
B 35/50 BT	135	2,437	99,5
B 35/50 BT	115	2,379	97,1
B 35/50 BT	110	2,331	95,1

A terceira experiência em obra foi na Estrada CL 612 (Medina de Rioseco-Villafrecós, Valladolid), com o espalhamento de uma camada de 4 cm de mistura AC 16 Surf com 5,0 % de betume 50/70 BT e temperaturas de fabrico a variar entre os 120 e 153 °C baixando a temperatura de compactação até 110 °C. Neste caso, as condições meteorológicas foram boas, com temperaturas acima dos 30 °C.

Nesta obra foram realizadas medições de emissões e de consumo de combustível, onde se verificou uma redução significativa de emissões de gases de efeito de estufa, com 40 % de CO₂, e uma diminuição de 26 % do consumo de combustível.

De modo a verificar o bom desempenho da mistura espalhada, executou-se o ensaio *Marshall* a diferentes temperaturas de fabrico e compararam-se com as propriedades mecânicas e volumétricas de uma mistura a quente. O Quadro 2.4 apresenta os dados obtidos, observando-se que as densidades e vazios das misturas são semelhantes.

Quadro 2.4 - Resultados do ensaio *Marshall* às misturas da Estrada CL 612 (Carvalho e Barreno, 2013)

<i>Marshall</i>	T agreg [°C]	T Comp. [°C]	Baridade aparente [g/cm ³]	Estabilidade [kN]	Vazios da mistura [%]
B 50/70	150	150	2,340 (100 %)	13,9 (100 %)	4,72 (100 %)
B 50/70 BT	135	135	2,337 (99,8 %)	12,7 (91,4 %)	4,81 (101,9 %)
B 50/70 BT	125	125	2,45 (100,2 %)	12,9 (92,8 %)	4,36 (92,4 %)

A última experiência em obra apresentada foi na Auto estrada A6 (Palencia), com o espalhamento de uma mistura BBTM 11B (misturas descontínuas para camadas de desgaste tipo B) com 5,2 % de BMP 45/80-65 BT (betume temperado modificado com polímeros), com as temperaturas de fabrico a situarem-se entre os 140 °C e os 130 °C, reduzindo a temperatura de compactação até 120 °C. As condições meteorológicas foram boas, com temperaturas acima dos 30 °C. Neste caso, apenas é mencionado que não foram encontradas diferenças entre a mistura fabricada com o betume temperado e a mistura com BMP 45/80-65 convencional.

2.4 Técnicas de produção de misturas betuminosas com betumes temperados

As maiores poupanças de energia, no âmbito da construção rodoviária, são conseguidas através da redução da temperatura de produção de misturas betuminosas. Nos dias de hoje, existem várias soluções técnicas disponíveis no mercado para alcançar esta redução de temperatura (Nynas, 2009).

As tecnologias das misturas betuminosas temperadas operam acima dos 100 °C e por isso a quantidade de água que resta na mistura final é muito pequena. Existem várias técnicas para reduzir a viscosidade efetiva do ligante, permitindo um revestimento completo dos agregados e a posterior compactação a temperaturas mais baixas (EAPA, 2010).

As técnicas de produção das misturas betuminosas temperadas estão subdivididas em três grupos: aditivos orgânicos, aditivos químicos e a formação de espuma de betume (EAPA, 2010).

2.4.1 Aditivos orgânicos

Os aditivos orgânicos, usualmente ceras e amidas gordas, podem ser adicionados à mistura betuminosa ou ao ligante, reduzindo a viscosidade do betume. A escolha do tipo de aditivo a utilizar deve ser bastante cuidadosa, para que o ponto de fusão seja mais elevado do que o esperado nas temperaturas de serviço, caso contrário a deformação permanente pode ser excessiva, e para que seja minimizada a fragilidade da mistura betuminosa a baixas temperaturas (EAPA, 2010).

Diferentes tipos de aditivos orgânicos podem ser utilizados para diminuir a viscosidade do ligante a temperaturas acima do ponto de amolecimento das ceras, de cerca de 90 °C, sendo a parafina um aditivo utilizado que é produzido pela conversão de gás natural (D'Angelo *et al.*, 2008; EAPA, 2010). Estes aditivos orgânicos, normalmente oferecem uma redução de temperatura entre 20 e 30 °C, ao mesmo tempo que também melhoram a resistência à deformação do betume modificado (EAPA, 2010). De acordo com Hurley e Prowell (2006) obtiveram-se reduções de temperatura de produção e compactação entre 18 e 54 °C, em estudos efetuados com aditivos orgânicos.

Nas misturas betuminosas temperadas, os aditivos orgânicos que mais são utilizados correspondem ao Sasobit®, Asphaltan B® e Licomont® BS 100.

2.4.2 Aditivos químicos

A principal ação dos aditivos químicos não é ao nível da redução da viscosidade, mas sim a modificação ao nível da interface do betume com os agregados permitindo melhorar o recobrimento dos agregados pelo ligante mesmo a baixas temperaturas (Hurley and Prowell, 2006), entre os 85 e 140 °C (EAPA, 2010). Os aditivos químicos podem ser inseridos diretamente no betume ou na fase de mistura, sob a forma regular, líquida ou utilizando emulsões, melhorando as condições de compactação, adesão, revestimento e trabalhabilidade das misturas betuminosas a quente a temperaturas inferiores (Pereira, 2010). Por conseguinte, é possível misturar o ligante e os agregados da mistura a temperaturas menores, assim como reduzir as temperaturas de compactação entre 20 a 30 °C (EAPA, 2010).

São vários os tipos de aditivos químicos utilizados nas misturas betuminosas temperadas, sendo os mais correntes: Evotherm®, Rediset® WMX, Revix®, Cecabase RT® e Rciemul 90®.

2.4.3 Formação de espuma de betume

O processo de formação de espuma de betume engloba um conjunto de constituintes na mistura, tais como o betume, o ar e a água. A adição da água ao betume transforma-se em vapor, sob determinadas condições, fazendo com que o betume expanda, por aumento da sua superfície específica, aumentando desta forma o seu volume inicial. Neste processo de

expansão, o betume adquire provisoriamente uma viscosidade muito baixa, até que o material arrefeça, podendo ser misturado com os agregados à temperatura ambiente, melhorando a sua dispersão na mistura final (EAPA, 2010).

A quantidade de expansão do betume depende de vários fatores, incluindo a quantidade de água adicionada e a temperatura da mistura betuminosa (Jenkins, 2000). A quantidade de água deve ser selecionada cuidadosamente uma vez que, a água gera fenómenos de descasque, recomendando-se, por conseguinte, a utilização de aditivos que ajudem nestes mesmos fenómenos, diminuindo assim a suscetibilidade da mistura à humidade (Zaumanis, 2010).

As técnicas de formação de espuma de betume são divididas em duas categorias: espuma de betume com minerais sintéticos ou naturais e espuma de betume por injeção de água. A tecnologia com recurso a minerais sintéticos ou naturais tem como base a utilização de zeólitos e a tecnologia com recurso a injeção de água é conseguida sob a forma de spray no betume quente ou adicionando uma fração de agregados finos húmidos (Ferreira, 2009).

As técnicas em questão podem permitir uma redução da temperatura da mistura betuminosa entre 20 a 30 °C (EAPA, 2010).

2.5 Incorporação de material fresado em misturas betuminosas

A incorporação de material fresado em misturas betuminosas tem sido um conceito inovador e cada vez mais abordado nos dias que correm. O material fresado obtém-se a partir de operações de desagregação de pavimentos degradados, designadas por fresagem de pavimentos, resultando um material composto por agregados e betume envelhecido. Desta forma, a reutilização de materiais fresados pretende constituir camadas de pavimentos com inclusão destes no fabrico de novas misturas ou em substituição de agregados britados (Reyes-Ortiz *et al.*, 2012).

Através da introdução desta técnica é possível reutilizar materiais de valor económico residual baixo, aumentar a capacidade de carga do pavimento, reduzir o consumo de agregados britados naturais e betumes novos e proteger o meio ambiente (Santos, 2010). A utilização de RAP nas misturas betuminosas permite a obtenção de um bom desempenho do pavimento, aplicando uma pequena quantidade de novos materiais, contribuindo para a preservação dos recursos naturais e para a redução de resíduos (Dinis-Almeida *et al.*, 2012a).

Cada ano, na Europa são produzidos cerca de 50 milhões de toneladas de RAP, sendo uma grande quantidade reutilizada e reciclada tendo por objetivo atingir os 100 %. Em muitos países, a reutilização e reciclagem de RAP começou há mais de 30 anos, sendo já uma prática comum, mostrando que a qualidade das misturas betuminosas contendo RAP é tão adequada como a qualidade das misturas betuminosas apenas com materiais naturais (EAPA, 2008). Na Figura 2.2

observa-se que a Alemanha, França e Itália são os países que têm vindo a destacar-se na produção de material fresado. Por outro lado, na Figura 2.3 observa-se que a Alemanha, a Holanda e a Suécia incorporam, na produção das misturas a quente e temperadas, as maiores percentagens de RAP na Europa.

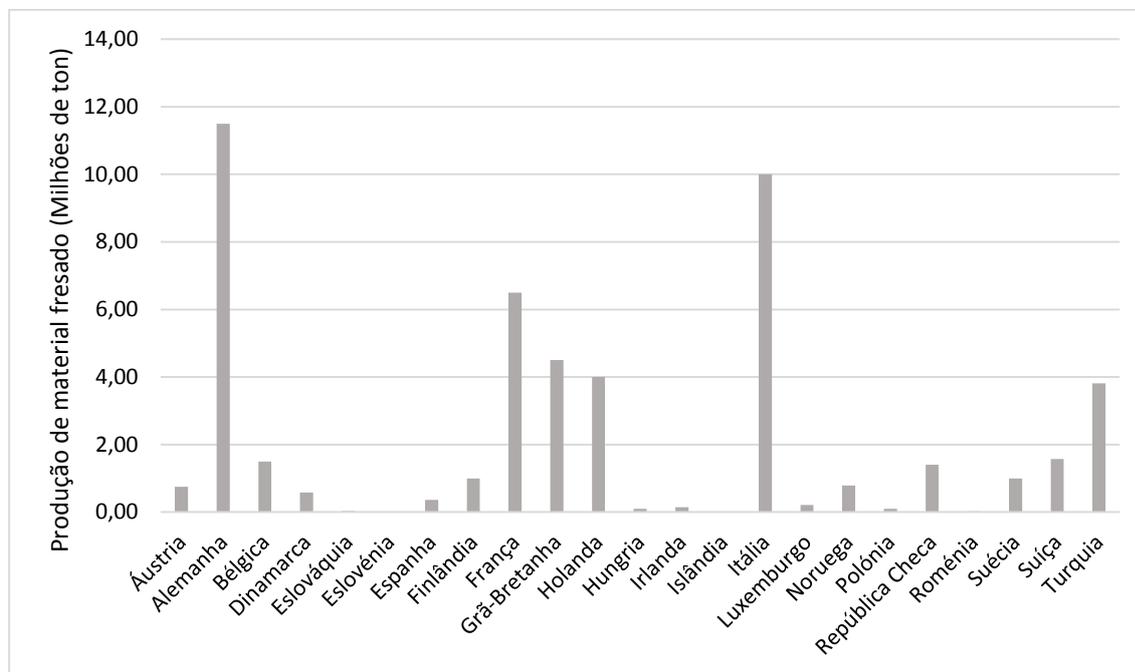


Figura 2.2 - Produção de material fresado na Europa (EAPA, 2013)

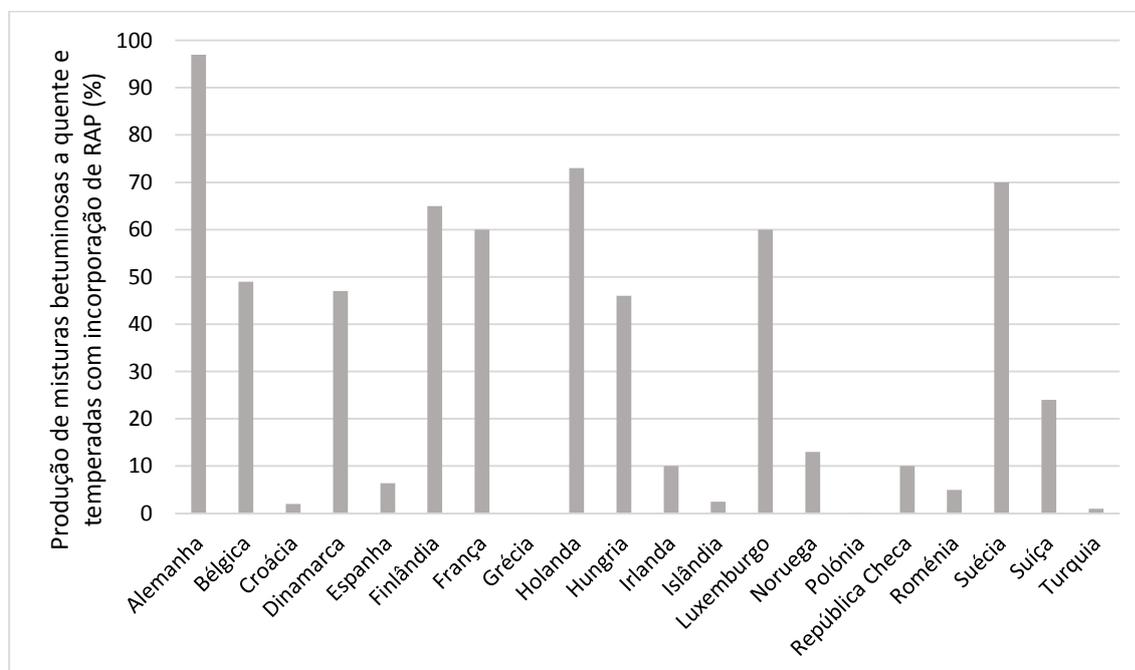


Figura 2.3 - Produção de misturas a quente e temperadas com incorporação de RAP (EAPA, 2013)

Em Portugal, o destino mais comum dado ao material fresado é a deposição ou abandono, como se observa no exemplo da Figura 2.4, não sendo pensada qualquer reutilização. Outro fim deste

material consiste na sua utilização em caminhos marginais ou secundários, públicos ou privados, reservados a tráfego sem qualquer significado e em que o material fresado funciona como base de suporte alternativa ao tradicional caminho de terra batida (Baptista, 2006).



Figura 2.4 - Depósito de material proveniente de fresagem, EN244 (adaptado de Dinis-Almeida, 2010)

A solução mais praticada, usando material fresado de misturas betuminosas, passa pela reutilização do material em novas misturas betuminosas recicladas. Segundo Baptista (2006), este fim para o material fresado é o mais nobre e ambientalmente mais desejável para o próprio material, pois acaba por desempenhar uma função idêntica à anterior, não baixa o valor económico da mistura e mantém a contribuição para o desempenho da estrutura do pavimento.

A maioria dos pavimentos, em Portugal, foram construídos no âmbito do Plano Rodoviário 2000, publicado em 1998, e segundo Fonseca *et al.* (2008) encontram-se agora no final da sua vida útil e a necessitar de ser intervencionados. Para além desta necessidade, acresce a persistente escalada de preços sentida nos derivados do petróleo, particularmente no betume utilizado nos pavimentos, fazendo com que a reciclagem do material fresado seja cada vez mais uma alternativa de reabilitação desejável, até a nível económico.

2.5.1 Técnicas de reciclagem de pavimentos

O objetivo fundamental da reciclagem de pavimentos é transformar um pavimento degradado numa estrutura homogénea e adaptada ao tráfego que vai suportar (Fonseca, 2002), consistindo na reutilização do material fresado para a construção de novas camadas e reduzindo a adição de novos agregados.

Existem várias opções de escolha dentro das diferentes técnicas de reciclagem que têm sido desenvolvidas, podendo optar-se por uma classificação segundo a temperatura a que são executadas as misturas, o local em que se realizam e o tipo de ligante que utilizam, Quadro 2.5 (Moreira e Pereira, 2007).

O ciclo de vida dos pavimentos betuminosos tem vindo a considerar-se com interesse económico e ambiental cada vez maior, devido à reciclagem de pavimentos e de misturas betuminosas. Esta reciclagem pode realizar-se *in situ*, estando na presença de uma intervenção que geralmente se designa como reciclagem do pavimento, ou, o material fresado das camadas betuminosas do pavimento antigo é transportado para uma central de fabrico e incorporado numa nova mistura, designada de mistura reciclada (CEPSA, 2010b).

Quadro 2.5 - Tipos de reciclagem (Antunes e Batista, 2009)

Tipos de reciclagem	
Localização da produção da mistura	a) <i>In situ</i> - na obra b) Em central
Temperatura de produção da mistura	a) A frio b) Temperadas e semi-temperadas c) A quente
Tipo de ligante	a) Betuminoso b) Hidráulico c) Mistura

A reciclagem *in situ* pode ser realizada mediante a aplicação de calor às camadas betuminosas, de forma a permitir a sua desagregação, a adição de novos materiais (rejuvenescedores, agregados, betume, etc), a mistura e homogeneização a quente de todos os materiais. Por outro lado, pode ser realizada mediante a fresagem a frio das camadas do pavimento e do seu tratamento com betumes especiais, emulsões ou espuma de betume (CEPSA, 2010b).

Na reciclagem de misturas betuminosas em central, os materiais provenientes da fresagem de pavimentos são transportados para uma central de fabrico de misturas betuminosas e incorporados no processo de fabrico de novas misturas. Nestas misturas deve colocar-se um betume mais mole que o habitual, um betume modificado ou contendo rejuvenescedores, que quando for misturado com o betume envelhecido da mistura fresada regenere o seu comportamento, de forma a que o desempenho da mistura reciclada seja semelhante a uma mistura convencional com materiais novos (CEPSA, 2010b). A reciclagem em central pode ser executada à temperatura ambiente, a quente, temperada ou semi-temperada, sendo a mais frequente a reciclagem a quente. No entanto, Portugal comparativamente com a maioria dos países europeus, ainda apresenta uma certa resistência à utilização de misturas recicladas resultante das incertezas sentidas pelo sector rodoviário, relativamente ao processo de fabrico e ao desempenho destas misturas em serviço (Baptista, 2006).

O tipo de central utilizada na produção de misturas betuminosas recicladas com betumes temperados é uma central a quente. Nesta tecnologia, a diferença para as misturas convencionais reside, simplesmente, na utilização de um betume temperado que necessita de

uma temperatura de fabrico inferior. De seguida, apresenta-se uma breve descrição da reciclagem a quente em central.

A reciclagem a quente em central é efetuada em centrais betuminosas a quente que estão divididas em contínuas ou de tambor-secador-misturador e em descontínuas. Existem limitações na quantidade de material fresado a reciclar, prendendo-se com o facto de ser um material constituído por agregados e betume envelhecido, que requer cuidados especiais durante o seu aquecimento, principalmente no que respeita à temperatura, que não deve exceder determinados valores por forma a não se propiciar mais o envelhecimento de um betume já por si envelhecido (Baptista, 2004).

Na reciclagem a quente em central fixa contínua as operações de mistura entre os agregados, o fíler, o betume e eventuais aditivos desenvolvem-se no tambor destinado á secagem e aquecimento dos agregados. Existem três métodos distintos para proceder ao aquecimento de uma mistura betuminosa recuperada em centrais contínuas: aquecimento por chama indireta, aquecimento por chama direta e aquecimento por contacto com os agregados sobreaquecidos (Dinis-Almeida, 2010).

O fabrico de misturas betuminosas recicladas a quente em central deve realizar-se aquecendo o material fresado sem queimar o betume, ou seja, sem o expor diretamente à chama do queimador ou sem o pôr em contacto com agregados muito quentes, impedindo que os gases produzidos sejam libertados para a atmosfera. Algumas centrais de fabrico de misturas betuminosas já estão preparadas para a incorporação do material fresado, enquanto outras irão precisar de algumas adaptações para que a incorporação do material fresado se possa fazer sem que ocorram os problemas anteriormente referidos (CEPSA, 2010b).

Na reciclagem em central fixa descontínua a mistura dos diversos componentes ocorre numa unidade específica para o efeito, ou seja, no misturador. Estas centrais incluem o método do RAP a quente, em que o material fresado é pré-aquecido num tambor-secador adicional, e o método *Recyclean* no meio do tambor secador, onde os agregados entram na extremidade do tambor secador e o material fresado é introduzido num anel central.

As conclusões de um estudo realizado por Baptista e Picado-Santos (2006) afirmam que as misturas betuminosas recicladas a quente com incorporação de fresado são totalmente confiáveis, pois apresentam um desempenho bastante satisfatório quando comparado com o das misturas convencionais.

2.6 Benefícios da utilização das misturas betuminosas com betumes temperados

Segundo D'Angelo *et al.* (2008), o desenvolvimento sustentável não se centraliza apenas no ambiente, abrange três áreas interdependentes: desenvolvimento económico, desenvolvimento social e proteção ambiental, como ilustra a Figura 2.5.

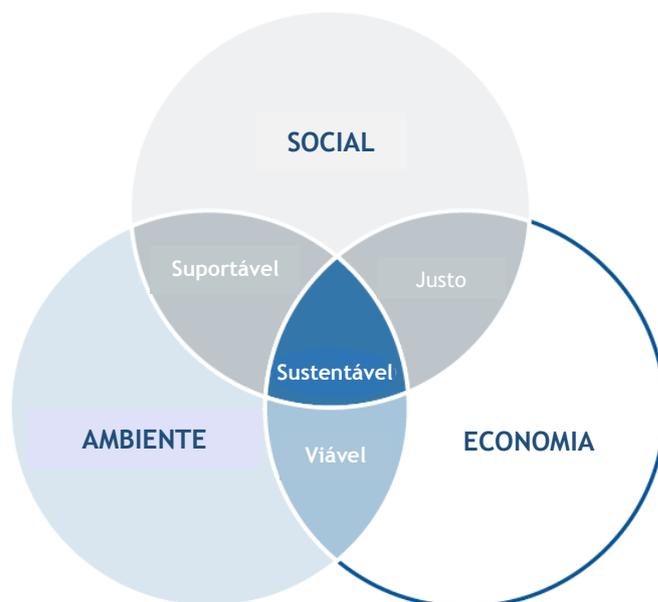


Figura 2.5 - Desenvolvimento sustentável (adaptado de D'Angelo *et al.*, 2008)

As vantagens no uso de betumes de baixa temperatura estão relacionadas com a sua utilização em misturas betuminosas temperadas e com a redução da temperatura de fabrico face às temperaturas geralmente aplicadas no fabrico das misturas a quente.

2.6.1 Benefícios sociais

As tecnologias para produção e construção de pavimentos betuminosos que utilizam menores temperaturas deverão ter maior redução das emissões. Estudos realizados, segundo D'Angelo *et al.* (2008), indicam que as emissões resultantes das centrais, em misturas betuminosas temperadas, são significativamente reduzidas, com valores entre 30 a 40 % de emissões de dióxido de carbono (CO₂) e dióxido de enxofre (SO₂), 50 % para os compostos orgânicos voláteis (COV), 10 a 30 % para o monóxido de carbono (CO), 60 a 70 % para os óxidos de azoto (NO_x) e 20 a 25 % para as poeiras.

A redução das emissões permite melhorar as condições de trabalho dos operários e as condições ambientais a nível global para a sociedade. As misturas betuminosas temperadas reduzem significativamente a exposição dos trabalhadores das centrais e das equipas de pavimentação de estradas aos fumos, em cerca de 30 a 50 %, comparativamente às misturas betuminosas a quente (D'Angelo *et al.*, 2008).

A segurança em obra por parte dos operários é maior nas misturas betuminosas temperadas, uma vez que o risco de queimaduras é muito menor relativamente ao que se tem verificado em trabalhos com misturas betuminosas a quente, garantindo uma melhor qualidade do ar e um trabalho mais cómodo (Dinis-Almeida, 2010).

São conhecidas também menores restrições na construção quando se trata destas misturas, nomeadamente a possibilidade de realizar pavimentações a temperaturas ambientais mais baixas, através de compactações adequadas, em épocas e regiões geográficas mais frias. A capacidade de transporte e aplicação a distâncias maiores às efetuadas usualmente oferece vantagens a nível social, conseguindo uma trabalhabilidade adequada, associada a compactações menos exigentes e permitindo a abertura ao tráfego mais rápida (D'Angelo *et al.*, 2008).

2.6.2 Benefícios ambientais

A possibilidade de realizar o trabalho, *in situ* ou em central, nas proximidades das obras, permite a redução dos transportes e dos combustíveis, tal como as emissões de gases associadas. Ensaio realizados em Valladolid, Espanha, demonstram uma redução das emissões de gases de efeito de estufa, de 40 % no caso de CO₂, e uma poupança do consumo de combustível (Carvalho e Barreno, 2013).

Como já mencionado, para as misturas betuminosas com betumes temperados, as reduções de emissões são significativas. Ferreira (2009) menciona que dados do *Fórum Bitumen*, de Ruhl e Lidemeyer (2006), relacionam as emissões com a temperatura, sabendo-se que temperaturas abaixo dos 80 °C, no limite, não causam emissões, temperaturas a 150 °C são apenas de 1 mg/h e acima de 180 °C são consideradas emissões relevantes.

Verifica-se que há menor quantidade de produção de desperdícios ao reciclar os pavimentos degradados, beneficiando-se da conservação dos recursos naturais, sendo que a taxa de reutilização pode ser de 100 % em misturas semi-temperadas e a frio (Dinis-Almeida, 2010).

A incorporação de altas taxas de material fresado em misturas betuminosas temperadas proporciona um aumento da trabalhabilidade, diminuindo os custos associados à obtenção de recursos naturais e à eliminação/redução de depósitos de resíduos (Fonseca *et al.*, 2008), diminuindo o impacto no meio ambiente, segundo uma publicação do programa *Waste and Research Accion Program* (WRAP) do Reino Unido (Nynas, 2009).

Os benefícios ambientais das misturas betuminosas permitem aos construtores dos países signatários do Protocolo de Quioto contribuírem para o seu cumprimento, pois estes devem utilizar tecnologias inovadoras na produção de misturas betuminosas mais ecológicas, protegendo o meio ambiente (Nunes *et al.*, 2008).

2.6.3 Benefícios económicos

De acordo com Dinis-Almeida (2010), os principais benefícios económicos são a poupança de combustível e de energia, existindo uma redução de 50 % durante a produção de misturas semi-temperadas. Por outro lado, o aumento de energia utilizado para alcançar as temperaturas desejadas conduz a uma diminuição dos benefícios económicos associados. Cálculos teóricos indicam que reduções de 28 °C podem resultar em poupanças de combustível de aproximadamente 11 %, com dados de relatórios que apontam para poupanças de combustível de 20 a 35 % na produção de misturas betuminosas temperadas (Prowell *et al.*, 2008).

Na utilização de misturas recicladas que incorporam material fresado, a redução de custos verifica-se na aquisição de agregados e na sua extração, pois a necessidade de material novo é menor implicando menores custos, em especial no betume (Fonseca *et al.*, 2008), assim como na eliminação de depósitos em vazadouros dos materiais provenientes da fresagem. Outras vantagens associadas à incorporação de material fresado estão relacionadas com a redução da viscosidade do ligante que atuará como promotor da compactação, a diminuição do envelhecimento do ligante que resulta das temperaturas mais baixas de produção aumentando a vida à fadiga da mistura, minimizando problemas de fissuração (Ruhl and Lidemeyer, 2006 citado por Ferreira, 2009).

Como grande benefício económico das misturas betuminosas com betumes temperados, tem-se a possibilidade de utilização de centrais betuminosas a quente. Zaumanis (2010) afirma que desta forma as centrais estão sujeitas a uma degradação menor devido às temperaturas mais reduzidas.

2.7 Inconvenientes da utilização das misturas betuminosas com betumes temperados

As tecnologias que têm sido desenvolvidas com misturas betuminosas temperadas, para além dos benefícios mencionados, têm alguns inconvenientes devidos às diferenças de temperatura, aos aditivos utilizados e à falta de estudos, comparativamente com as misturas a quente. Nos seguintes parágrafos vão ser enunciados alguns inconvenientes referidos por diversos autores.

A baixa temperatura das misturas temperadas leva a algumas preocupações e incertezas de utilização. Os materiais usados nos pavimentos realizados com estas misturas são recentes, e devido a este facto, os dados que existem para aprovar ou recusar algumas das técnicas ou produtos usados ainda estão a ser testados (Zaumanis, 2010). Outro aspeto negativo é a falta de informação destas misturas acerca do comportamento a longo prazo e à falta de análise quantitativa do ciclo de vida para avaliar o desempenho das misturas (Chuwdhury and Button, 2008).

Os custos devidos à aquisição de aditivos são acrescidos, devendo ser previamente estudados, pois se reduzirem o consumo de energia irão diminuir os custos globais de produção de misturas betuminosas temperadas, de forma a garantir poupanças. A diminuição de emissões é reduzida nestas misturas, mas contudo a utilização de aditivos gera emissões que são desfavoráveis. Uma vez que, alguns dos aditivos usados têm na sua composição ceras que quando cristalizam tendem a aumentar a viscosidade e a rigidez do ligante, fazendo com que o comportamento dos aditivos não seja satisfatório a temperaturas atmosféricas muito baixas (Zaumanis, 2010).

Por vezes é necessário, em algumas tecnologias, adaptar os equipamentos existentes para a produção de misturas betuminosas com betumes temperados em centrais, acarretando custos (Zaumanis, 2010).

Podem surgir problemas de fissuração e assentamentos prematuros nos pavimentos causados pela presença de água, aquando da utilização de espuma de betume nas misturas betuminosas temperadas. Esta situação deve-se à eventualidade de surgir vaporização da água durante a fase de mistura e de pavimentação, ou a mesma ser incompleta (Zaumanis, 2010).

Nos estudos efetuados por Hurley e Prowell (2006) as misturas betuminosas temperadas têm elevada sensibilidade à água, justificando-se pela reduzida temperatura de produção e compactação, que implicam uma secagem incompleta dos agregados, sendo que, simultaneamente, com o menor envelhecimento do ligante leva à formação precoce de rodeiras.

Capítulo 3 - Caracterização da resistência à fadiga das misturas betuminosas

3.1 Introdução

A investigação no domínio da formulação de misturas betuminosas, nos últimos anos, tem sido direcionada para o desenvolvimento de novos métodos que integram critérios baseados no conhecimento das características mecânicas das misturas betuminosas, nomeadamente, o módulo de rigidez, a resistência à fadiga e à deformação permanente (Picado-Santos, 2005 citado por Dinis-Almeida, 2010).

Com o passar dos tempos tem-se verificado o progresso de vários métodos de ensaio, assim como de diversos tipos de equipamentos que têm evoluído, para analisar o comportamento das misturas betuminosas em pavimentos rodoviários. Estes desenvolvimentos devem-se à necessidade de melhorar o desempenho estrutural dos pavimentos, ou seja, aumentar a sua qualidade funcional que está relacionada com o número de veículos que circula na rede viária, a velocidade de circulação e as cargas por eixo (Bispo, 2013).

A resistência à fadiga é uma característica mecânica essencial das misturas betuminosas e de acordo com Nynas (2011), é importante saber os teores de betume a utilizar nas misturas para que o seu comportamento seja o mais vantajoso, para além de uma boa capacidade de cura que também é crucial para garantir a longevidade de uma estrada.

Segundo Gontijo (1980), citado por Cardoso (2012), a fadiga é definida por um processo de degradação estrutural, progressivo e localizado, que um material sofre, em um ou vários pontos, a tensões ou deformações repetidas, podendo culminar na fissuração ou rotura completa do material após um suficiente número de repetições.

O fendilhamento por fadiga nas camadas betuminosas e no solo de fundação é um dos mecanismos mais frequentes de degradação de pavimentos, associado à ação do tráfego. Verifica-se que ao longo do tempo há uma diminuição do comportamento e da capacidade resistente dos materiais dos pavimentos, sendo que estes dependem dos fatores “ativos” que são diretamente responsáveis pela deterioração do pavimento, tal como a ação do tráfego e do clima, e dos fatores “passivos” que estão relacionados com a qualidade de produção das misturas ou com a qualidade de construção do pavimento, influenciando a eficácia de retardamento da referida degradação (Lopes, 2009).

Quanto ao desempenho estrutural, o fenômeno da fadiga é uma propriedade mecânica que assume especial importância ao nível da formulação das misturas betuminosas e quando se pretende dimensionar um pavimento rodoviário flexível ou estabelecer uma adequada solução numa obra de reabilitação de um pavimento. O dimensionamento de um pavimento consiste em calcular o estado de tensão e deformação devido ao tráfego, fixando a geometria e as propriedades dos materiais que constituem o pavimento, verificando os critérios de ruína, como é o caso da avaliação da resistência à fadiga (Pais *et al.*, 2000).

Por regra, o estudo do comportamento mecânico das misturas betuminosas é feito em laboratório, realizando ensaios que permitem determinar as características de deformabilidade e avaliar o seu desempenho à fadiga, assim como à deformação permanente. Neste capítulo é apresentada uma descrição dos ensaios de laboratório mais divulgados para caracterizar a resistência à fadiga representando as condições a que os pavimentos betuminosos são expostos durante a vida útil.

3.2 Resistência à fadiga de misturas betuminosas

A resistência à fadiga das misturas betuminosas é uma característica fundamental para analisar o desempenho dos pavimentos. Segundo Teixeira (2000), a resistência à fadiga de uma mistura betuminosa pode ser definida como sendo a sua capacidade em responder à aplicação de cargas repetidas provenientes da ação do tráfego, para determinadas condições de velocidade de tráfego e de temperatura, sem atingir a rotura. Quanto maior a resistência à fadiga de uma mistura, maior será o número de passagens que ela aguentará e, conseqüentemente, maior será a sua durabilidade.

A rotura por fadiga ocorre quando as misturas betuminosas, que apresentam um comportamento viscoelástico, possuem a parte elástica do módulo de rigidez superior à parte viscosa. O comportamento viscoelástico acontece quando as camadas betuminosas, condicionadas pelo comportamento do ligante, exibem a temperaturas intermédias um comportamento mais representativo das condições de serviço, enquanto que a temperaturas baixas o comportamento é elástico e a temperaturas altas o comportamento é viscoso (Lopes, 2009). Nesta situação, apesar das misturas betuminosas suportarem razoavelmente bem a aplicação de cargas provenientes do tráfego, com a aplicação contínua destes carregamentos, levam à fissuração do material (Perret, 2003 citado por Otto, 2009). O aparecimento da fendilhação será maior, quanto maior for o número de carregamentos provocados pela passagem do tráfego (Mendes, 2011). Por outro lado, uma mistura betuminosa resiste tanto melhor, quanto maior for a durabilidade e, portanto, o teor de betume (Barrão, 2011).

A resistência à fadiga de uma mistura betuminosa é expressa normalmente através de relações estabelecidas entre a tensão, ou a extensão, inicial e o número de repetições de carga que conduz à ruína do material. Estas relações podem ser determinadas experimentalmente em

laboratório através de ensaios de carácter repetitivo, de flexão, tração direta, tração indireta, realizada com ensaios diametrais e com ensaios triaxiais (Minhoto, 2005). Cada um dos ensaios referidos pode ser realizado para determinados níveis de extensão ou de tensão, como será mencionado mais à frente.

O fendilhamento por fadiga é uma das principais causas de deterioração dos pavimentos, representando em muitos casos, a sua degradação inicial. A fendilhação é um fenómeno que pode ser definido consoante a sua origem, conhecendo-se três tipos:

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

O fendilhamento devido a variações térmicas acontece devido às amplitudes de temperatura que podem ocorrer nos ciclos dia/noite, em locais onde se verifiquem grandes variações diárias de temperatura e também em locais em que as temperaturas são normalmente baixas, levando assim ao endurecimento da mistura, tornando-a mais frágil para o aparecimento de fissuras.

É nos pavimentos que foram sujeitos a intervenções de reforço que ocorre o fenómeno de fendilhamento por reflexão de fendas, como por exemplo, quando uma camada betuminosa é colocada sobre outra que se encontrava fendilhada, devendo-se este acontecimento ao diferente comportamento das duas camadas quando sujeitas às ações de tráfego ou quando existem variações térmicas assinaláveis (Miranda, 2008).

O fendilhamento por fadiga, por fazer parte do estudo deste trabalho, vai ser alvo de uma abordagem mais profunda, apresentando-se em seguida.

3.2.1 Fendilhamento por fadiga

A acumulação de passagens do tráfego induz nos pavimentos uma degradação de carácter progressivo, designada de fendilhamento por fadiga. Sempre que o número de passagens do tráfego ultrapassa o número de passagens admissíveis pelo material, ocorre o fendilhamento que conduz à rotura do pavimento por fadiga e, esta pode influenciar a globalidade da estrutura do pavimento ou ser limitada apenas à camada de desgaste (Minhoto, 2005).

Minhoto (2005) enuncia a teoria clássica da fadiga, de acordo com Molenaar *et al.* (1997), que diz que o fendilhamento associado ao carregamento cíclico do tráfego tem início na base das camadas betuminosas, zona em que existem os maiores esforços de tração, propagando-se no sentido da superfície do pavimento, à medida que vão sendo aplicados os ciclos de carga.

O fenómeno de fendilhamento por fadiga é caracterizado consoante a sua evolução no pavimento, verificando-se que existe uma aceleração da propagação das degradações ao longo

da evolução das fissuras nas camadas betuminosas e conseqüentemente um enfraquecimento progressivo da estrutura do pavimento. Este facto deve-se à entrada de água pelas fissuras existentes à superfície que potencia o fenómeno de bombeamento de finos, transformando o processo num acontecimento cíclico entre camadas, em que a degradação de uma camada leva à degradação das camadas seguintes, ao favorecer o aparecimento de outras fissuras (Dias, 2009).

O pavimento encontra-se numa fase de degradação avançada, quando é visível um fendilhamento significativo à superfície da camada de desgaste. A propagação do fendilhamento na base das camadas betuminosas, que estão apoiadas sobre camadas de módulo de rigidez inferior, começa por conduzir a um fendilhamento longitudinal à superfície no local onde se fazem sentir as maiores tensões de tração, ou seja, coincidindo com o local de passagem dos rodados dos veículos no pavimento, como se pode ver na Figura 3.1. O módulo de rigidez é o quociente entre a tensão aplicada e a extensão que daí resulta, sob determinadas condições de carregamento e de temperatura. Apesar das tensões, de uma forma geral, serem inferiores à resistência à tração do material, a sua repetida aplicação provoca a progressiva micro fissuração do material, com a redução da sua rigidez até se chegar à ruína (Antunes, 2005).

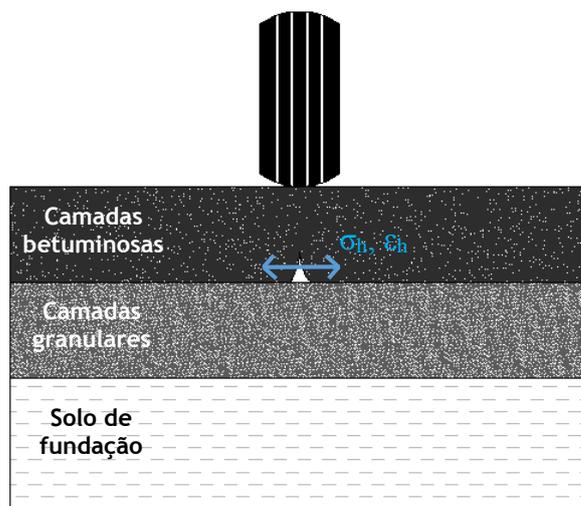


Figura 3.1 - Fendilhamento por fadiga (adaptado de Antunes, 2005)

Posteriormente, as fissuras longitudinais interligam-se pelo aparecimento de novas fissuras longitudinais e transversais, dando origem à designada “pele de crocodilo”. Da evolução da “pele de crocodilo” resultam os ninhos, por desintegração da camada de desgaste, com início no ponto de cruzamento das fendas. Os ninhos, como se observa na Figura 3.2, podem ainda resultar de uma zona localizada com deficiente capacidade de suporte ou de um defeito localizado na camada de desgaste ou camada de base (Pereira e Miranda, 1999), transformando o pavimento numa superfície sem a adequada comodidade e segurança para os utilizadores da via em que circulam.



Figura 3.2 - Evolução do fendilhamento por fadiga (Covilhã)

O comportamento do fenómeno de fadiga depende do nível de sollicitação para todos os materiais, sendo que em algumas situações é possível observar que abaixo de um determinado valor de amplitude de sollicitação o material poderá não sofrer rotura, podendo ser sollicitado infinitas vezes, ou com um valor experimentalmente muito grande, sem observar a rotura do provete. O valor de amplitude de sollicitação denomina-se limite de fadiga ou limite de resistência do material (*De La Roche, 1996* citado por *Otto, 2009*), como representado na Figura 3.3. Até ao momento, nenhum limite de resistência tem sido observado para as misturas betuminosas.

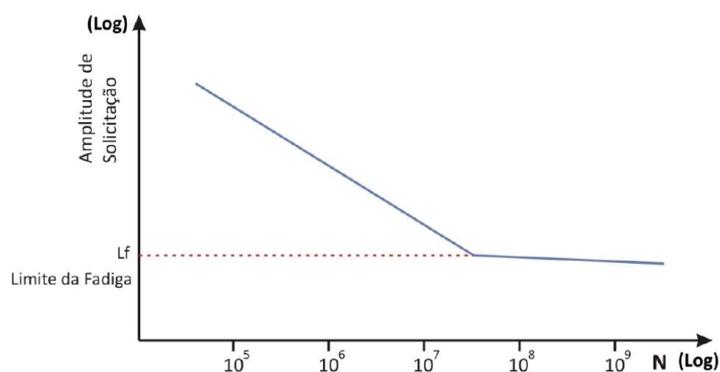


Figura 3.3 - Limite da fadiga (*De La Roche, 1996* citado por *Otto, 2009*)

A reprodução em laboratório do fenómeno de fadiga é realizada através de ensaios que pretendem simular o que acontece nos pavimentos betuminosos na realidade, tendo em conta as variáveis que *in situ* podem influenciar o comportamento da mistura. A determinação da resistência à fadiga consiste em submeter provetes a uma sequência de sollicitações que se repetem, registando o número de aplicações de carga até o provete atingir a rotura.

3.3 Fatores que influenciam a resistência à fadiga

Pode dizer-se que a caracterização da resistência à fadiga de uma mistura betuminosa depende fortemente das características dos seus constituintes e da sua distribuição volumétrica na mistura, assim como, dos fatores tráfego, temperatura e compactação da mistura (*Teixeira, 2000*).

Tangella *et al.* (1990), citado por Dias (2009), enuncia quatro fatores principais: o modo de carregamento (ações de tráfego), a composição da mistura (tipo, quantidade de betume e tipo de agregados), o processo de compactação da mistura e as ações climáticas. De acordo com a EAPA (2002), o envelhecimento também afeta consideravelmente a mistura, diminuindo a sua resistência à fadiga, pois o endurecimento sofrido pela mistura provoca um aumento de rigidez, tornando a mistura betuminosa mais frágil, favorecendo o seu fendilhamento.

A aplicação de camadas betuminosas com maior espessura, devido ao aumento constante do tráfego, e principalmente aos veículos pesados, a maior pressão de enchimento dos pneus duplos por simples, conseqüentemente, com maior carga por eixo e maiores tensões induzidas ao pavimento, são fatores que, juntamente com as condições climáticas, proporcionam o fenômeno de fendilhamento por fadiga com origem na superfície da camada de desgaste (Freitas, 2004 citado por Dias, 2009).

Dos diversos fatores que influenciam a resistência à fadiga das misturas betuminosas, enunciados por vários autores, destacam-se os que se apresentam nos seguintes parágrafos.

A ação do tráfego de veículos pesados é influenciada pelo aumento da pressão de enchimento dos pneus, para fazer face ao aumento da carga transportada, provocando uma maior concentração de tensões nos bordos laterais dos pneus, que irá salientar o aumento de tensões nas zonas laterais dos rodados dos veículos, surgindo assim o fendilhamento longitudinal com origem à superfície do pavimento (Baladi *et al.*, 2003 citado por Dias, 2009).

As baixas temperaturas de serviço proporcionam o endurecimento da mistura, tornando-a mais suscetível ao fendilhamento, devendo-se também à diminuição das propriedades viscoelásticas da mistura, originadas pelo aumento de rigidez do betume. Este fator pode ser atenuado, utilizando betumes com menor viscosidade.

Uma boa compactação da mistura constituinte da camada de um pavimento contribui decisivamente, não apenas para o aumento de rigidez, mas para uma melhor propagação das cargas provenientes do tráfego, o que conduz a uma diminuição das tensões horizontais e verticais instaladas na camada, garantindo um melhor comportamento da mistura à fadiga (Teixeira, 2000).

A maior percentagem de finos numa mistura leva a uma menor tendência de fendilhação, devido à menor segregação superficial do material. A relação entre a quantidade de finos e o betume deve ser elevada para que as deformações sejam menos importantes a altas temperaturas, reduzindo ao mesmo tempo o risco de fadiga (Riviere, 1996 citado por Otto, 2009).

O baixo teor de betume provocará um aumento da rigidez da mistura, tornando-a mais propícia a sofrer fendilhamento, visto que diminui as propriedades viscoelásticas da mistura betuminosa, o que provoca a segregação dos agregados devido ao menor envolvimento das partículas pelo betume.

A capacidade estrutural de uma mistura diminui quando o volume de vazios é elevado, pois existem maiores espaços entre as partículas sem estarem preenchidos pelo betume, podendo provocar de igual forma, uma diminuição da resistência à fadiga e potencializar a segregação superficial dos agregados.

Em misturas recicladas acresce a influência das características do material fresado e a taxa de reciclagem, que afetam sobretudo as características de deformabilidade, sendo relevante na resistência à fadiga (Leandri *et al.*, 2012).

Portanto, as propriedades das misturas betuminosas dependem dum conjunto de fatores, alguns ligados às solicitações e outros associados à composição das misturas, tal como o desempenho das misturas é condicionado pela ação do tráfego e da temperatura. Em laboratório, os resultados e o comportamento das misturas, para determinado tipo de ensaio, dependem das condições de ensaio adotadas (temperatura, frequência de carregamento e estado de tensão) e dos parâmetros das misturas, como o tipo e a quantidade de betume, as características dos agregados, a utilização de material fresado e a porosidade da mistura.

3.4 Avaliação do comportamento à fadiga das misturas betuminosas

Nas infra-estruturas de transporte e mais concretamente na rede rodoviária, os utilizadores tornaram-se mais exigentes ao nível da segurança e do conforto de condução, bem como da aplicabilidade dos dinheiros públicos no que respeita aos serviços prestados.

A resistência à fadiga das misturas betuminosas é um parâmetro fundamental no desempenho dos pavimentos onde este tipo de material é aplicado. A realidade é que o fendilhamento por fadiga é uma das principais causas de deterioração dos pavimentos, representando em muitos casos, a sua degradação inicial.

A caracterização do comportamento à fadiga de misturas betuminosas é obtida através de ensaios de simulação e ensaios de laboratório. Os ensaios de simulação dizem respeito a ensaios de simulação em pista (à escala real ou reduzida) e pretendem simular o comportamento das misturas sujeitas às cargas representativas dos rodados dos veículos pesados. Os ensaios de laboratório, onde se enquadra o ensaio de flexão em quatro pontos usado neste estudo,

consistem em aplicar num provete com determinada geometria, consoante o tipo de ensaio, cargas repetidas e de amplitude constante, até se atingir a rotura do provete.

Os ensaios de laboratório para caracterização da resistência à fadiga podem diferir segundo o modo de aplicação da carga, podendo realizar ensaios a tensão controlada ou a extensão controlada, representados na Figura 3.4. A carga aplicada ao provete, nos ensaios realizados a tensão controlada, é constante em cada aplicação, aumentando a deformação com a diminuição do módulo de rigidez do provete, até se atingir a rotura, ou seja, até se verificar a abertura, geralmente, de uma fenda. Este tipo de ensaio é habitualmente utilizado na avaliação de camadas betuminosas de grande espessura. Nos ensaios realizados a extensão controlada, a extensão é constante, diminuindo a tensão até se verificar a abertura de fissuras, que usualmente surgem como micro fissuras não visíveis. Este tipo de ensaio é regularmente utilizado na avaliação de camadas betuminosas de pouca espessura e foi o utilizado no estudo experimental do presente trabalho.

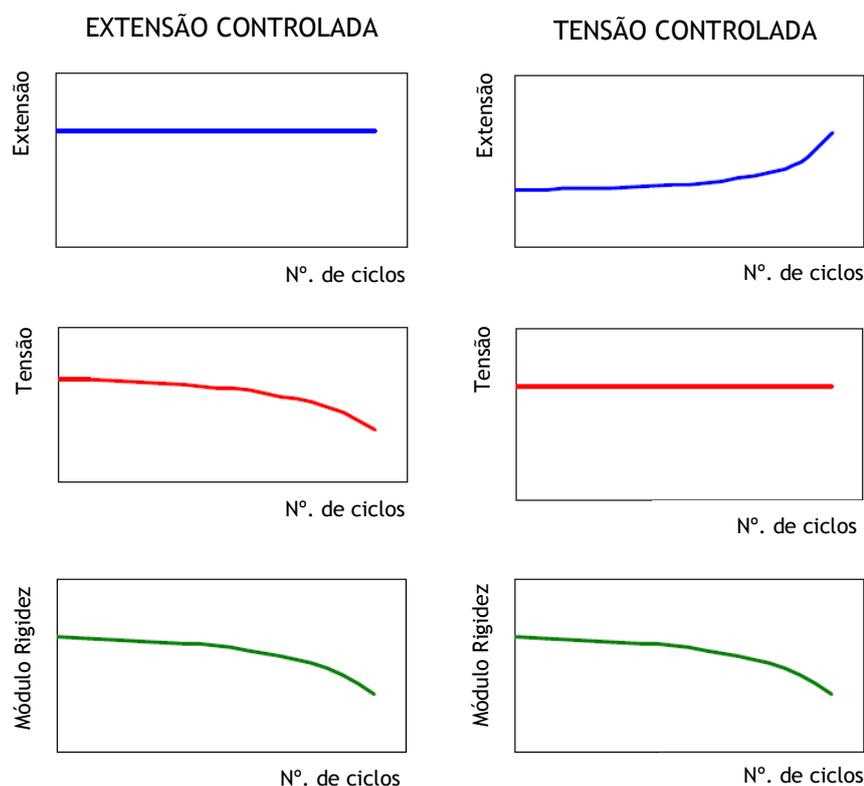


Figura 3.4 - Evolução típica da tensão, extensão e módulo de rigidez, em ensaios de fadiga em extensão controlada e em tensão controlada (Baptista, 2006)

Para cada tipo de ensaio também diferem os critérios de rotura. O critério de rotura nos ensaios de tensão controlada corresponde ao momento em que a deformação do provete, no local de aplicação da carga, é o dobro do valor inicial. Nos ensaios a extensão controlada, o critério de rotura corresponde ao momento em que se verifica uma redução de 50 % do módulo de rigidez em relação ao valor verificado inicialmente.

Como já mencionado, o fendilhamento por fadiga ocorre quando as misturas betuminosas exibem um comportamento viscoelástico, onde predomina a parte elástica que ocorre a temperaturas baixas a moderadas, em que as camadas conseguem suportar a aplicação repetida de esforços de tração. As temperaturas utilizadas em Portugal para o estudo da resistência à fadiga situam-se entre os 20 e os 25 °C. No entanto, a aplicação de um número significativo de carregamentos origina uma perda de resistência das camadas betuminosas por fadiga e o seu fendilhamento progressivo. Este fenómeno acontece tanto mais rápido, quanto mais elevados forem os esforços de tração instalados. Desta forma a resistência à fadiga depende do estado de tensão induzido, pelo que este comportamento é expresso através de leis de fadiga.

3.4.1 As leis de fadiga

A vida à fadiga de uma mistura betuminosa é expressa pelo número de ciclos de carga até à rotura, como já mencionado. Ensaio de fadiga realizados em vários provetes e para diferentes amplitudes de extensão de tração mostram que o número de ciclos até à rotura é função da amplitude da extensão aplicada durante o ensaio. Desta forma, quanto maior for a amplitude de extensão de tração imposta ao provete, menor vai ser o número de ciclos de carga aplicados à mistura. Como nos ensaios de extensão controlada a amplitude de extensão é mantida constante, a força aplicada ao provete vai diminuindo ao longo do ensaio.

As leis de comportamento à fadiga obtidas em laboratório, regra geral, relacionam a extensão máxima de tração induzida com o correspondente número de aplicações de carga que conduz à rotura do material por fadiga. Estas leis são obtidas através do ensaio de vários provetes, por cada nível de extensão imposto (Miranda *et al.*, 2008). Os resultados dos ensaios de fadiga em laboratório são interpretados com base na lei de fadiga, descrita pela expressão (3.1).

$$\varepsilon_t = a \times N^b \quad (3.1)$$

Onde:

ε_t - extensão de tração (10^{-6});

N - número de aplicações de carga até à rotura;

a, b - coeficientes determinados experimentalmente.

A expressão (3.1) indica que a lei de fadiga terá um desenvolvimento linear, considerando um sistema de eixos coordenados, com escala logarítmica, marcando em abcissas o número de ciclos aplicados e em coordenadas o valor da extensão correspondente. Por este motivo, a realização de apenas dois níveis de extensão pode ser suficiente para a definição da lei de fadiga (Pais e Ferreira, 2000).

Quando se pretende utilizar a lei de fadiga obtida em laboratório para dimensionamento, esta deve ser corrigida de modo a levar em conta alguns aspetos difíceis de reproduzir em

laboratório, tais como os períodos de repouso que ocorrem no pavimento entre carregamentos, o tempo real de propagação do fendilhamento através das camadas betuminosas e o facto dos rodados dos veículos pesados atuarem sempre no mesmo local (Baptista, 2006).

A avaliação da resistência à fadiga é também importante quando inserida num processo de formulação de misturas betuminosas. Na interpretação dos resultados, neste contexto, além da comparação das leis de fadiga obtidas, utiliza-se com frequência os parâmetros:

ε_6 - extensão de tração necessária para provocar a rotura por fadiga ao fim de 10^6 ciclos;

N_{100} - resistência à fadiga para uma extensão de tração de 100×10^{-6} .

No presente trabalho é utilizada a expressão (3.1) para obter as leis de fadiga, no entanto outras instituições desenvolveram expressões para definir o comportamento à fadiga de misturas betuminosas. A seguir é apresentado um exemplo.

- Shell

$$\varepsilon_t = (0,856 \times V_b + 1,08) \times E_m^{-0,36} \times N^{-0,2} \quad (3.2)$$

Onde:

ε_t - extensão de tração (10^{-6});

V_b - volume de betume na mistura betuminosa (%);

E_m - rigidez da mistura betuminosa (Pa);

N - número de aplicações de carga até à rotura.

Os estudos realizados nas últimas décadas, quanto ao comportamento de misturas betuminosas, têm levado a inúmeros conhecimentos, que são estabelecidos com base na observação de trechos experimentais. Apesar deste facto, a resistência à fadiga de uma mistura betuminosa é um processo complexo, devendo-se aos diversos fatores que contribuem para o desenvolvimento deste fenómeno e à sua difícil previsão ao longo do tempo.

3.5 Ensaios laboratoriais de caracterização da resistência à fadiga

Os ensaios utilizados para caracterizar as misturas betuminosas com betumes temperados, e as mesmas com incorporação de material fresado, são essencialmente os mesmos a que se recorre para caracterizar as misturas betuminosas convencionais. Destes ensaios destacam-se os ensaios de avaliação da resistência à fadiga.

Estes ensaios, tal como outros que fazem a caracterização mecânica das misturas, são realizados em condições o mais idênticas possíveis das observadas nos pavimentos quando em serviço, sobretudo no que respeita à temperatura, ao tempo de carregamento e ao estado de tensão.

Nesta subsecção vão ser descritos os ensaios mais utilizados para caracterizar a resistência à fadiga das misturas betuminosas. No entanto, será feita uma descrição mais detalhada do ensaio de flexão em quatro pontos, uma vez que é este o ensaio utilizado para fazer a caracterização da resistência à fadiga das misturas betuminosas no estudo experimental.

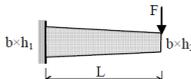
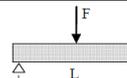
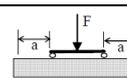
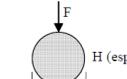
A caracterização da resistência à fadiga é realizada tendo por base a norma europeia EN 12697–24:2004, *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 24: Resistance to fatigue*, Anexos A, B, C, D e E, correspondentes aos ensaios de flexão em dois pontos, provetes prismáticos trapezoidais e prismáticos retangulares, em três pontos, em quatro pontos e ensaio de tração indireta ou compressão diametral, respetivamente.

A norma mencionada não especifica uma temperatura de ensaio e frequência de carregamento concretas, por isso é também considerada a norma europeia EN 13108, que estabelece as condições de ensaio e normaliza o fabrico de misturas betuminosas a nível europeu, permitindo a sua marcação CE, ou seja, a livre circulação no espaço europeu. A parte 20 da referida norma diz respeito aos ensaios utilizados na certificação de misturas betuminosas. Desta forma, a norma europeia EN 13108-20:2006, *Bituminous mixtures - Material specifications - Part 20: Type Testing*, especifica para o ensaio de flexão em dois pontos uma temperatura de 10 e 15 °C e frequência de carregamento de 25 e 30 Hz, respetivamente, para provetes prismáticos trapezoidais e prismáticos retangulares, e para o ensaio de flexão em quatro pontos uma temperatura de 20 °C e frequência de carregamento de 30 Hz.

A frequência de carregamento utilizada no estudo experimental, com o ensaio de flexão em quatro pontos, foi de 10 Hz, correspondente a uma aplicação de carga de aproximadamente 0,018 segundos. A adoção desta frequência justifica-se pela elevada experiência na realização de ensaios a 10 Hz, e à falta de referências de ensaios realizados a 30 Hz, correspondente aproximadamente a uma velocidade real de rolamento do veículo que aplica a carga a 60 km/h (Barbosa, 2012), considerando-se assim como adequada para avaliar a resistência à fadiga.

De seguida são descritos os ensaios de flexão acima mencionados e apresentados no Quadro 3.1 de forma esquemática, que permitem avaliar a resistência à fadiga.

Quadro 3.1 - Principais tipos de ensaios de caracterização da resistência à fadiga (Batista, 2006)

Tipo de ensaio	Tipo de provete	Designação	Esquema do ensaio
Ensaio de flexão em dois pontos	Prismático trapezoidal	2PB-TR (two-point bending test on trapezoidal shaped specimens)	
Ensaio de flexão em dois pontos	Prismático retangular (vigas)	2PB-PR (two-point bending test on prismatic shaped specimens)	
Ensaio de flexão em três pontos	Prismático retangular (vigas)	3PB-PR (three-point bending test on prismatic shaped specimens)	
Ensaio de flexão em quatro pontos	Prismático retangular (vigas)	4PB-PR (four-point bending test on prismatic shaped specimens)	
Ensaio de tração indireta ou compressão diametral	Cilíndrico	IT-CY (indirect tensile test on cylindrical shaped specimens)	

3.5.1 Ensaio de flexão em dois pontos

O ensaio de flexão em dois pontos, segundo a norma EN 12697-24, pode ser realizado em provetes prismáticos trapezoidais ou retangulares (vigas). Este ensaio caracteriza-se por ter um ponto de carga e um ponto de apoio, em que a carga é aplicada em consola sobre os provetes trapezoidais (2PB-TR) ou sobre vigas (2PB-PR).

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.

A forma e dimensões do provete trapezoidal foram fixadas de modo a afastar da base do provete a secção de tensões transversais máximas, impondo a rotura numa secção distinta da base correspondente à fixação do provete. A Figura 3.5 ilustra a geometria do provete e o Quadro 3.2 apresenta as dimensões recomendadas, ambas segundo a norma EN 12697-24.

Este ensaio permite a inversão do sentido do carregamento, realizando a recuperação da deformação do provete entre carregamentos sucessivos, uma vez que o dispositivo de aplicação de cargas é fixo à superfície de topo do provete. Outra vantagem é a realização de vários ensaios em simultâneo utilizando um equipamento adaptado, desenvolvido pelos franceses. Porém, a desvantagem deste ensaio verifica-se na dificuldade da preparação dos provetes, dada a não ortogonalidade das faces laterais relativamente às bases e às reduzidas dimensões da

secção transversal menor, averiguando-se uma maior dispersão nos resultados obtidos, comparativamente com outros métodos de ensaio (Teixeira, 2000).

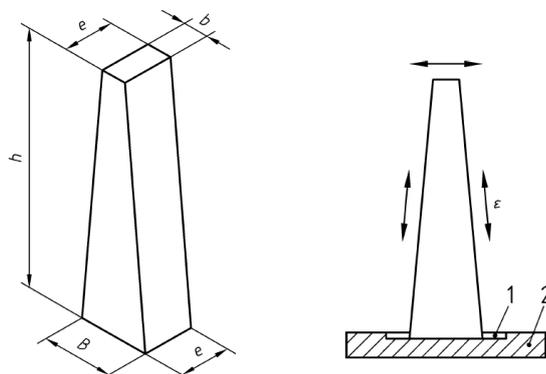


Figura 3.5 - Geometria e fixação do provete trapezoidal (EN 12697-24)

Quadro 3.2 - Dimensões mínimas do provete (adaptado da EN 12697-24)

Dimensões do provete	Provete trapezoidal (Tipo de mistura)			Provete prismático (Tipo de mistura)	
	$D \leq 14$ mm	$14 < D \leq 20$ mm	$20 < D \leq 40$ mm	$D \leq 22$ mm	$D > 22$ mm
B	56 ± 1	70 ± 1	70 ± 1	—	—
b	25 ± 1	25 ± 1	25 ± 1	40 ± 1	80 ± 1
e	25 ± 1	25 ± 1	50 ± 1	40 ± 1	80 ± 1
h	250 ± 1	250 ± 1	250 ± 1	160 ± 1	320 ± 1

3.5.2 Ensaio de flexão em três pontos

O ensaio de flexão em três pontos caracteriza-se por ter dois pontos de apoio e um ponto de carga, com carregamento central nas vigas simplesmente apoiadas (3PB-PR). Segundo a norma EN 12697-24, este ensaio apenas pode ser realizado com provetes cuja máxima dimensão do agregado seja de 22 mm e para espessuras de pelo menos 50 mm. No caso de se moldarem provetes em laboratório a norma anterior remete para a norma EN 12697-33:2003, *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 33: Specimen prepared by roller compactor*, segundo a qual os provetes devem respeitar as dimensões de 300 x 50 x 50 mm.

Neste tipo de ensaio, a tensão máxima de tração verifica-se na secção do provete sob a carga aplicada, onde o provete irá sofrer rotura. A existência de uma imperfeição numa outra secção do provete pode levar a que a rotura não ocorra na secção de tração máxima.

3.5.3 Ensaio de flexão em quatro pontos

O ensaio de flexão em quatro pontos, realizado com provetes prismáticos simplesmente apoiados, é um dos ensaios mais utilizados em Portugal para a avaliação do comportamento à fadiga de misturas betuminosas e está especificado na norma EN 12697-24. Caracteriza-se por

ter dois pontos apoiados e dois pontos de carga, com carregamento em dois pontos da viga simplesmente apoiada (4PB-PR).

A metodologia do ensaio consiste na aplicação de um carregamento sinusoidal repetido representativo das ações do tráfego a que o pavimento está sujeito ao longo da sua vida em serviço. O carregamento é transmitido através dos dois apoios internos, verticalmente e perpendicularmente ao eixo longitudinal. Estes apoios internos estão localizados a um terço dos apoios externos da viga e simétricos em relação ao centro do provete, sendo também nestes apoios o local de aplicação das cargas verticais. Os quatro apoios sobre os quais é colocado o provete permitem livre rotação e translação, sendo o deslocamento vertical impedido pelos dois apoios externos fixos. As tensões de tração máximas são geradas ao longo de cerca de um terço da extensão do provete, sendo mais provável que a rotura ocorra numa destas secções de tensão máxima. Este tipo de ensaio vai induzir danos contínuos nos provetes a ensaiar até que o provete sofra rotura, podendo ser observado através da redução gradual da rigidez inicial do material (Capitão *et al.*, 2012).

Na Figura 3.6 apresenta-se o equipamento de ensaio utilizado neste estudo e instalado nos laboratórios de Engenharia Civil da UBI para realização do ensaio de flexão em quatro pontos, que permite avaliar as características de resistência à fadiga. Este equipamento é composto por um suporte constituído por quatro apoios, sobre o qual o provete fica simplesmente apoiado nos apoios externos, um braço servopneumático, que aplica uma força por intermédio dos apoios internos, e transdutores. O equipamento situa-se num espaço com controlo de temperatura e um computador para recolha de resultados.



Figura 3.6 - Equipamento para o ensaio 4PB-PR (DECA-UBI)

Os provetes usados neste ensaio podem ser obtidos através de amostras recolhidas *in situ*, ou moldados em laboratório, tal como são utilizados neste estudo.

Para este ensaio, a norma EN 12697-24, recomenda que as dimensões, conforme Figura 3.7, da secção das vigas (b e h) sejam no mínimo iguais ao triplo da máxima dimensão do agregado e

que a distância entre os dois apoios exteriores, comprimento efetivo dos provetes (L), seja igual ou maior a cerca de seis vezes o maior dos valores de b e h . Quanto ao comprimento total do provete (L_{tot}), este deve apresentar um valor que não exceda o comprimento efetivo, em mais de 10 %.

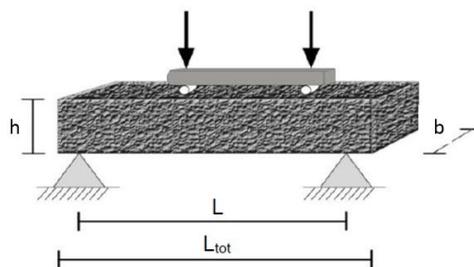


Figura 3.7 - Dimensões genéricas dos provetes prismáticos usados no ensaio 4PB-PR
(adaptado de Miranda, 2008)

Para garantir que as dimensões do provete são respeitadas, a norma indica que a diferença entre os valores máximos e mínimos medidos para a largura (b) e altura (h) do provete, não deve ser superior a 1 mm. Da mesma forma, a diferença entre os valores máximos e mínimos medidos para a dimensão do comprimento efetivo (L) não deve ser superior a 2 mm.

Para a determinação do comprimento efetivo devem efetuar-se quatro medições distintas com régua, de erro máximo 1 mm, a meio da superfície das faces inferior e superior do provete. A altura e largura dos provetes devem ser medidas através de um paquímetro, com erro máximo de 0,1 mm, nos locais onde se vão localizar os apoios. A dimensão do comprimento efetivo deve ser a média aritmética dos quatro valores medidos, assim como as dimensões b e h devem ser calculadas de forma similar, utilizando as medições da largura e altura, respetivamente.

O equipamento para aplicação de carga e o provete a ensaiar devem ser colocados à temperatura de ensaio durante um tempo não inferior a 2 horas, caso a temperatura de ensaio seja de 0 °C, e de 1 hora, caso a temperatura de ensaio seja de 20 °C, tal como no presente estudo.

Com o equipamento utilizado neste ensaio é permitido realizar ensaios com várias frequências de carregamento. Conforme referido anteriormente, a norma EN 12697-24 não estabelece um valor de referência, permitindo a utilização de frequências entre os 0 e os 60 Hz. Assim, no presente estudo utilizou-se uma frequência de 10 Hz, pela justificação já mencionada, para a realização do ensaio de flexão em quatro pontos.

Previamente à realização do ensaio, a temperatura e frequência de carregamento devem ser estabelecidas, tal como os níveis de tensão ou extensão, que são função do modo de carregamento escolhido, devendo permitir uma resistência à fadiga entre 10^4 e 2×10^6 ciclos de carga, até ser atingida uma redução de 50 % do módulo de rigidez inicial, como representado

na Figura 3.8, medido no centésimo carregamento. Uma vez que, é objetivo do ensaio determinar o número de ciclos de aplicação de carga até que o provete atinja a rotura, este ensaio é considerado destrutivo.

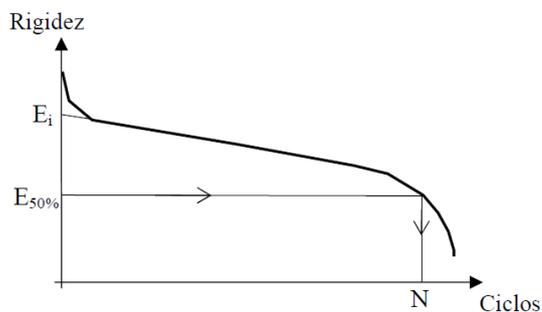


Figura 3.8 - Definição da rotura em ensaios de flexão em quatro pontos com extensão controlada (Ferreira, 2009)

O ensaio de flexão em quatro pontos permite, através de um sistema que fixa o provete, a inversão do sentido da carga e, conseqüentemente, recuperar a deformação produzida pelos sucessivos carregamentos, conforme se ilustra na Figura 3.9. A deformação máxima sofrida pelo provete é medida por um transdutor, denominado *Linear Variable Displacement Transducer* (LVDT), 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. O LVDT deve ser calibrado e colocado no ponto de leitura, através de um parafuso devidamente apertado e ajustado à face superior do provete, de modo a efetuar leituras próximas de zero.

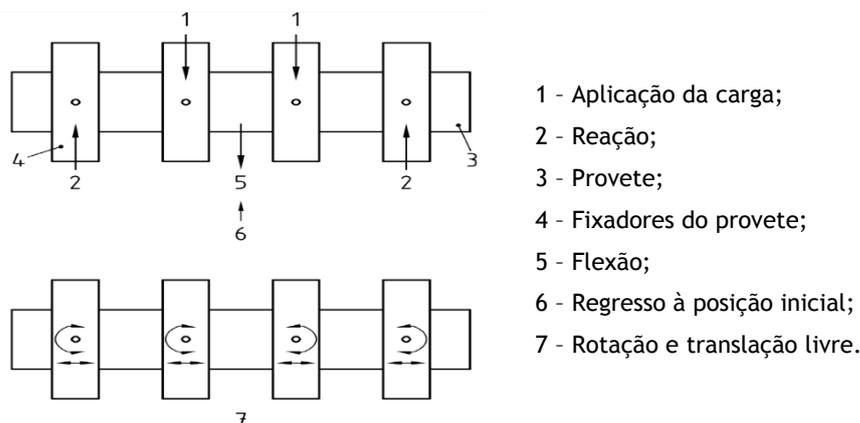


Figura 3.9 - Princípios básicos do ensaio 4PB-PR (adaptado da EN 12697-24)

De acordo com Teixeira (2000), as vantagens associadas a este ensaio são o funcionamento estrutural muito simples e boa compreensão dos resultados obtidos e o facto de a rotura ocorrer numa zona de tensões constantes e máximas. Aspeto que conduz a uma menor dispersão dos resultados dos ensaios, sendo o ensaio mais adequado para o estudo da resistência à fadiga (Palha *et al.*, 2009). A vantagem dos ensaios de fadiga de flexão em quatro pontos,

relativamente à flexão em três pontos, deve-se ao facto de nos ensaios de flexão em quatro pontos a rotura do material ocorrer numa zona de momento fletor máximo constante sem esforço transversal (Minhoto, 2005). Teixeira (2000) enuncia uma desvantagem que consiste na dificuldade em obter os provetes, pois obriga à compactação de lajetas para depois, por serragem, se obterem os provetes de ensaio.

3.5.4 Ensaio de tração indireta ou compressão diametral

O ensaio de tração indireta ou compressão diametral (IT-CY), especificado na norma EN 12697-24, é constituído por um sistema de aplicação de cargas com funcionamento hidráulico ou pneumático, uma célula de carga que mede o valor da força aplicada numa das geratrizes do provete cilíndrico e transdutores do tipo LVDT localizados no plano horizontal, perpendicularmente ao plano de carga, colocados de forma diametralmente oposta.

A Figura 3.10 apresenta o equipamento *Nottingham Asphalt Tester* (NAT), instalado nos laboratórios de Engenharia Civil da UBI para o ensaio de tração indireta ou compressão diametral.



Figura 3.10 - Equipamento para o ensaio IT-CY (DECA-UBI)

Este equipamento é constituído por um conjunto de componentes, representados esquematicamente na Figura 3.11. Para além dos componentes referidos, outros elementos são necessários na realização deste tipo de ensaio, tais como uma câmara climatizada com controlo de temperatura, um sistema regulador de pressão e reservatório de ar comprimido e uma interface digital de entrada de dados e saída de resultados ligada a um computador.

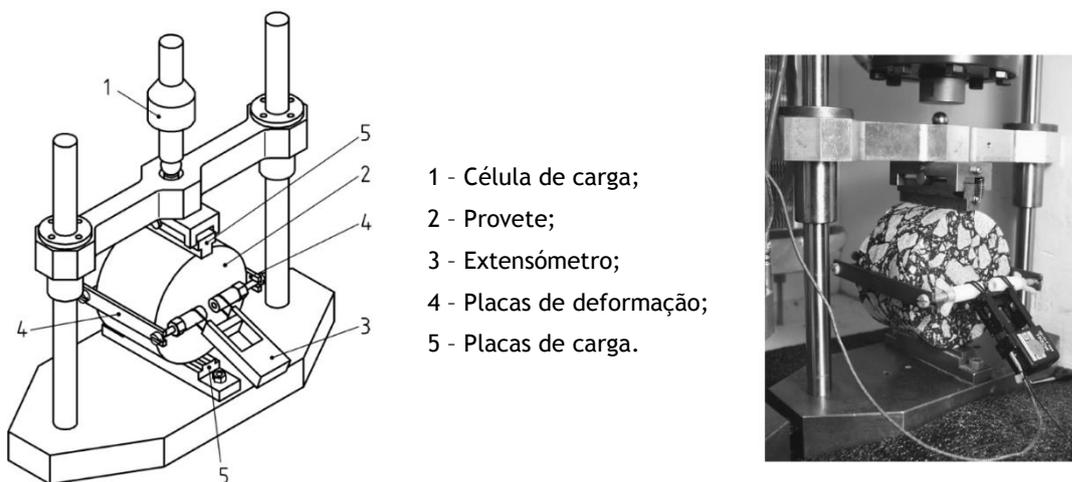


Figura 3.11 - Representação esquemática do equipamento para realização do ensaio IT-CY (adaptado da EN 12697-24)

De acordo com a norma, em misturas com agregado de diâmetro máximo até 25 mm os provetes cilíndricos devem apresentar altura mínima de 40 mm e diâmetro de 100 ± 3 mm e em misturas com agregado de diâmetro máximo até 38 mm a altura deve ser no mínimo de 60 mm e diâmetro de 150 ± 3 mm.

É desenvolvido um estado de tensão de tração no provete, gerado por aplicação de cargas repetidas no plano perpendicular à direção do carregamento e ao longo do plano diametral vertical, sendo que este estado de tensão é constante ao longo de todo o plano vertical, induzindo a deformação do provete e verificando a rotura no provete numa zona de tensão máxima de tração, como se vê na Figura 3.12.

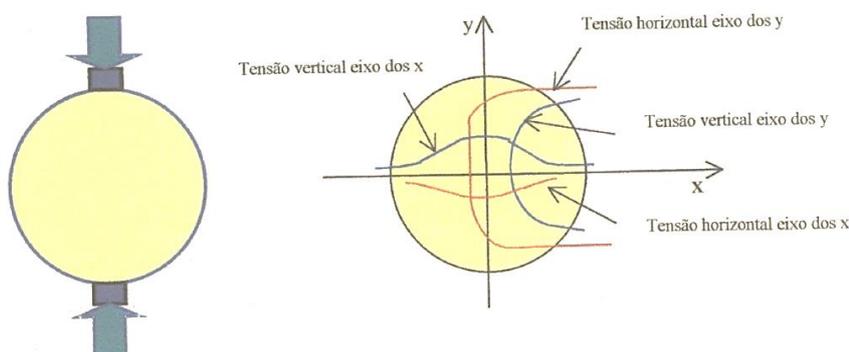


Figura 3.12 - Esquema de carregamento e diagrama de tensões instaladas (Teixeira, 2000)

Na determinação da resistência à fadiga através deste ensaio, a norma EN 12697-24 refere que o provete deve ser submetido a um carregamento cíclico de amplitude constante, de modo a abranger um nível de extensões entre 100 e 400 μm , que garantam uma vida à fadiga do provete ensaiado entre 10^3 e 10^6 aplicações de carga. O tempo de carregamento deve apresentar uma

duração de 0,1 segundos, com períodos de repouso de 0,4 segundos, de modo a simular o intervalo entre a aplicação de cargas.

O princípio do ensaio baseia-se na aplicação de um carregamento pulsatório com tempo de repouso, podendo ser realizado a tensão controlada ou extensão controlada. Este controlo é realizado por uma unidade que define o controlo da força aplicada ou da deformação instalada no provete. A força aplicada no provete é transmitida por meio de uma célula de carga, sendo a medição da deformação realizada pelo LVDT. Com o objetivo de definir a vida à fadiga da mistura betuminosa, torna-se necessário registar, para vários ciclos de carga, a força máxima de tração e deformação sofrida pelo provete no momento da força máxima.

Teixeira (2000) apresenta algumas vantagens para este ensaio, tais como, a facilidade de obtenção de provetes cilíndricos, quer por compactação em laboratório, quer por carotagem *in situ*, a simplicidade da técnica de ensaio e interpretação de resultados, o estado de tensão do tipo bi-axial e a rotura do provete que ocorre numa secção de tensões de tração uniformes e máximas.

Para além destas vantagens, o ensaio de tração indireta ou compressão diametral, segundo o mesmo autor, apresenta uma série de desvantagens conhecidas no que diz respeito à avaliação da resistência à fadiga. Como o provete é sujeito a um carregamento cíclico, verifica-se que quando lhe é aplicado o carregamento seguinte ainda não recuperou totalmente da deformação imposta pelo carregamento anterior. Desta forma, verifica-se uma acumulação da deformação com a aplicação cíclica de carga, resultando na obtenção de deformações permanentes no provete, dificultando a interpretação dos resultados. Outra desvantagem é o facto de quando se sujeita um provete à compressão diametral, vão ocorrer tensões de compressão elevadas, na zona de contacto do provete com as placas do equipamento, que podem provocar a ruína nesta zona do provete (Baptista, 2006).

Capítulo 4 - Estudo experimental

4.1 Introdução

O estudo experimental que se apresenta neste capítulo tem como objetivo descrever os materiais utilizados na realização deste trabalho, tal como as propriedades fundamentais e os respetivos ensaios de três misturas betuminosas, com vista à caracterização da resistência à fadiga, utilizando o ensaio de flexão em quatro pontos.

As três misturas destinadas a aplicação numa camada de desgaste, foram caracterizadas através de uma metodologia de formulação, que pretende determinar a composição de uma mistura betuminosa a quente, tida como referência, e de duas misturas betuminosas com betumes temperados, com e sem incorporação de material fresado.

Os materiais utilizados na produção das misturas betuminosas com betumes temperados respeitam determinados requisitos análogos às misturas betuminosas a quente. Estes requisitos são referenciados em especificações normalizadas (EN), no Caderno de Encargos das Estradas de Portugal (EP, 2012) e no *Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes - Artículo 542 - Mezclas betuminosas en caliente tipo hormigón betuminoso* (PG-3, OC 29/2011). O uso da especificação espanhola deve-se ao facto de ter sido utilizado neste trabalho experimental o estudo realizado pela CEPESA, em Espanha (Barreno e Carvalho, 2013), como comparação com os resultados obtidos.

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

4.2 Caracterização dos materiais utilizados

As misturas produzidas neste estudo incluem agregados naturais, ligantes betuminosos e material fresado. Neste subcapítulo são caracterizados fisicamente estes materiais, apresentando a análise granulométrica, massa volúmica e absorção de água.

4.2.1 Agregados naturais

Os agregados naturais utilizados na produção das misturas betuminosas foram o pó de pedra e duas britas provenientes da pedreira da Capinha explorada pela empresa Cimpor Agregados, concelho do Fundão. De acordo com a classificação na central de britagem desta empresa, estas duas britas correspondem à brita 3/6 e à brita 5/15. Para além destes agregados, todas as misturas incorporam cal hidráulica. Pode ver-se na Figura 4.1 cada um dos agregados naturais utilizados.



Figura 4.1 - Agregados naturais incorporados nas misturas betuminosas

As características físicas, químicas, geométricas e mecânicas de cada agregado contribuem para um bom comportamento das misturas durante a fase de construção do pavimento e ao longo da vida útil no desempenho em serviço. Para tal, foram realizados ensaios de caracterização de acordo com as normas em vigor, apresentados posteriormente.

4.2.2 Ligantes betuminosos

A mistura betuminosa a quente contém betume asfáltico 35/50, da CEPESA Portuguesa Petróleos, S.A., correntemente utilizado na produção de misturas betuminosas a quente. Este betume obedece à especificação da norma EN 12591:2009, *Bitumen and bituminous binders - Specifications for paving grade bitumens*. A gama de temperaturas recomendadas para o fabrico das misturas situa-se entre os 162 a 166 °C e para a compactação, a gama de temperaturas recomendada é entre 152 a 156 °C.

As misturas betuminosas com betumes temperados contém betume temperado 35/50, designado de betume BT 35/50, também da CEPESA Portuguesa Petróleos, S.A.. Este ligante é um betume convencional de baixa temperatura que cumpre a especificação da norma EN 12591 e tem temperaturas de trabalho e de bombeio semelhantes à do betume convencional 35/50, podendo reduzir as temperaturas de fabrico das misturas (CEPSA, 2010a).

No Quadro 4.1 estão as características de penetração e temperatura de amolecimento para ambos os betumes utilizados, de acordo com o certificado de análise.

Quadro 4.1 - Características dos betumes asfálticos (CEPSA)

Ensaio	Betume 35/50	Betume BT 35/50
Penetração 25 °C, 100 g, 5 seg [0,1 mm]	45	47
Temperatura de Amolecimento [°C]	54,5	54,7

Como apresentado no Quadro 2.1, a temperatura recomendada, utilizando o betume BT 35/50, para fabrico das misturas é superior a 125 °C e para a compactação das misturas é superior a 115 °C.

4.2.3 Material fresado

O material fresado (RAP) observado na Figura 4.2 e utilizado na mistura betuminosa com betume temperado proveio da A23, nó de Vila Velha de Ródão. Este material, derivado da fresagem de pavimento, enquadra-se nas misturas betuminosas recuperadas, de acordo com a norma NP EN 13108-8:2011, Misturas betuminosas - Especificações dos materiais - Parte 8: Misturas betuminosas recuperadas, que estabelece requisitos referentes às propriedades do ligante e dos agregados.



Figura 4.2 - Material fresado do nó de Vila Velha de Ródão

De forma a poder determinar o teor de betume envelhecido do material fresado, este foi sujeito a uma incineração em mufla de ignição, nos laboratórios do DECA da UBI, de acordo com a norma EN 12697-39:2004, *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 39: Binder content by ignition*. Na Figura 4.3 observa-se uma amostra de material fresado, antes e depois da extração do ligante, assim como a mufla onde se realizaram os ensaios.



Figura 4.3 - Método da incineração em mufla (DECA-UBI)

O Quadro 4.2 apresenta os resultados obtidos do teor de betume envelhecido presente no material fresado, correspondente a uma percentagem de massa perdida.

Quadro 4.2 - Teor de betume envelhecido do material fresado (média de 7 amostras)

Material fresado (RAP)	% Média de massa perdida	Teor médio de betume [%]
A23	49,7	5,0

A caracterização do betume envelhecido presente no material fresado em análise foi também realizada pela *Proas Betunes* CEPSA, nos laboratórios em Madrid. Neste caso, o método utilizado para a extração do betume envelhecido foi por centrifugação, realizado segundo a norma EN 12697-1:2000, *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 1: Soluble binder content*. No Quadro 4.3 apresentam-se os resultados obtidos para as características analisadas.

Quadro 4.3 - Caracterização do betume envelhecido do material fresado (*Proas Betunes* CEPSA)

Características	Amostra de material fresado da A23
Penetração [0,1 mm]	11
Temperatura de amolecimento [°C]	82,6
Teor de betume [%]	5,2

Segundo os resultados expostos no quadro, o betume do material fresado em causa apresenta-se bastante envelhecido, com uma penetração baixa e com uma temperatura de amolecimento muito alta. O teor de betume envelhecido obtido revelou-se ligeiramente maior que o obtido nos laboratórios do DECA, podendo dever-se ao número de amostras usadas.

4.2.4 Análise granulométrica

A análise granulométrica para os agregados que as misturas betuminosas incorporam foi efetuada de acordo com a norma NP EN 933-1:2000, Ensaio das propriedades geométricas dos agregados - Parte 1: Análise granulométrica - Método de peneiração. O ensaio consiste na separação, por meio de um conjunto de peneiros ordenados de forma decrescente quanto à abertura da malha, de um material em diversas classes granulométricas. O método de peneiração implica que os agregados passem por uma lavagem seguida da peneiração a seco. Quando a lavagem altera as características físicas de um agregado, apenas se procede à peneiração a seco.

A secagem dos agregados foi efetuada em estufa, por um período de 24 h, a uma temperatura de 110 ± 5 °C. Antes de proceder à peneiração, os peneiros foram pesados numa balança eletrónica, colocados por ordem decrescente num agitador mecânico e submetidos a vibração durante 5 minutos. Após este tempo, pesou-se a quantidade de material que ficou retida em cada peneiro.

A série de peneiros utilizada está de acordo com as especificações espanholas (PG-3, OC 29/2011), correspondendo a um fuso granulométrico de uma mistura densa AC 16 Surf D, para

uma mistura betuminosa aplicada em camadas de desgaste. Tendo em vista a análise dos resultados deste estudo e dos resultados dos estudos realizados pela CEPISA nas experiências em obra já mencionadas, em Espanha, justifica-se a escolha deste fuso.

O Caderno de Encargos das Estradas de Portugal, S.A. apresenta um fuso granulométrico para o material fresado, tendo sido adotado o fuso II, uma vez que é recomendado para camadas com espessuras da ordem dos 6 a 10 cm, como é o caso das camadas de desgaste. Na Figura 4.4 apresentam-se os limites do referido fuso e a curva granulométrica do material fresado antes da extração do betume envelhecido.

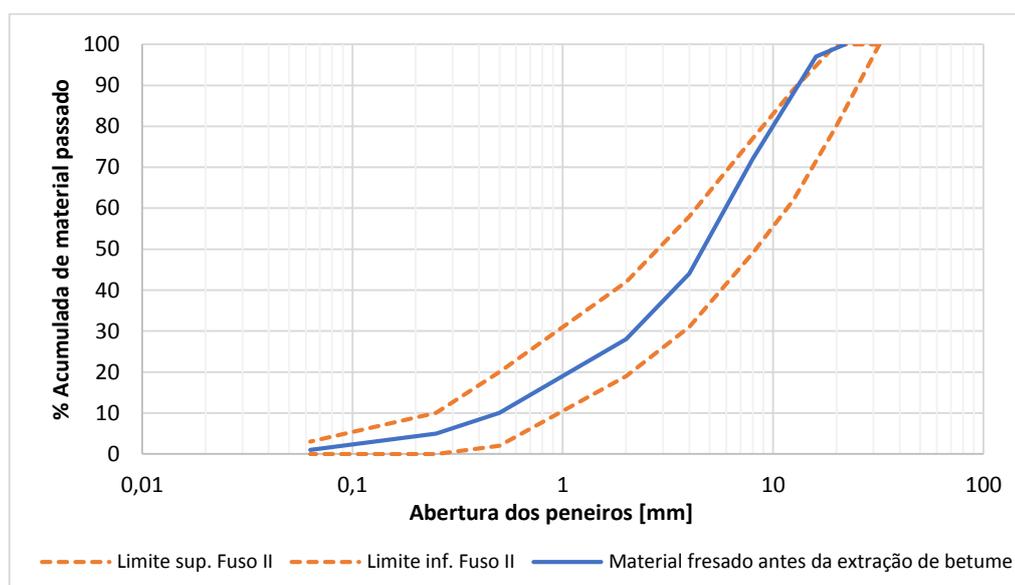


Figura 4.4 - Fuso II e curva granulométrica do material fresado antes da extração de betume

Da análise da Figura 4.4, resulta o cumprimento da curva granulométrica do material fresado, verificando-se, no entanto, que no peneiro com abertura de 12,5 mm este material excede o limite superior do fuso. Este incumprimento pode ser devido à amostra recolhida para a análise granulométrica, sendo considerado irrelevante para o estudo.

No Quadro 4.4 apresentam-se os resultados das granulometrias de cada agregado. Note-se que para o material fresado a análise granulométrica foi feita após extração do betume envelhecido. Na Figura 4.5 observam-se as curvas granulométricas dos agregados.

Quadro 4.4 - Análise granulométrica dos agregados

Abertura dos peneiros [mm]	% Acumulada de material passado				
	Cal hidráulica	Pó de pedra	Brita 3/6	Brita 5/15	Material fresado (RAP)
22	100	100	100	100	100
16	100	100	100	100	98
8	100	100	100	37	78
4	100	83	46	0	55
2	100	59	2	0	42
0,500	100	32	0	0	27
0,250	100	22	0	0	18
0,063	100	8	0	0	6

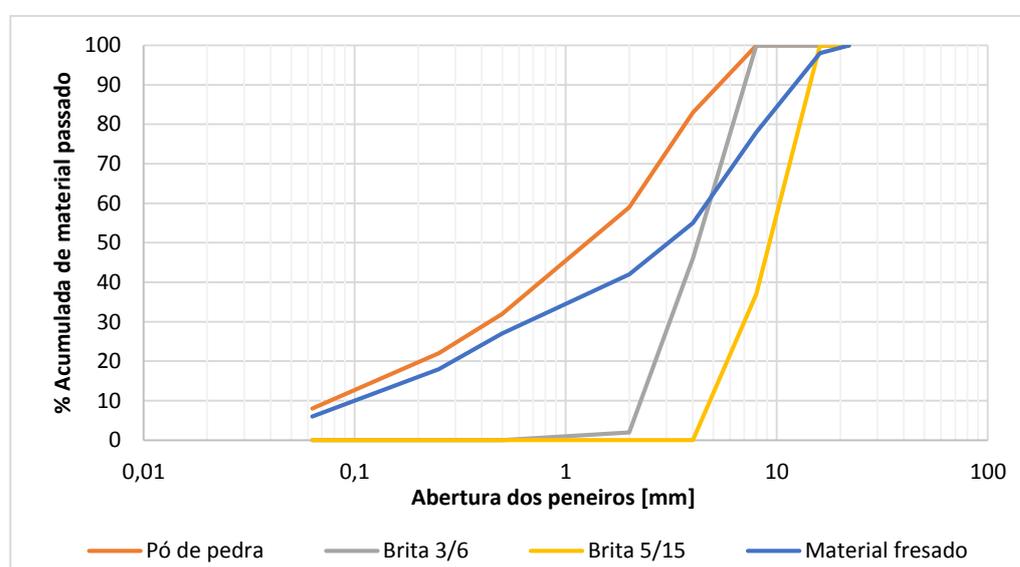


Figura 4.5 - Curvas granulométricas dos agregados

4.2.5 Massa volúmica e absorção de água

A determinação da massa volúmica das partículas e da absorção de água dos agregados foram realizadas 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 principais métodos que a norma indica são o método do cesto de rede metálica, utilizado para agregados como a brita 5/15, e o método do picnómetro, para agregados como o pó de pedra, a brita 3/6 e o material fresado.

Para determinar a massa volúmica da brita 5/15 foi recolhida uma amostra de 1000 g e o cálculo foi realizado de acordo com a expressão (4.1). A amostra dos restantes agregados também foi de 1000 g e a massa volúmica foi calculada através da expressão (4.2).

$$\rho_{ssd(\text{cesto metálico})} = \frac{M_1}{M_1 - (M_{2a} - M_{3a})} \times \rho_w \quad (4.1)$$

$$\rho_{ssd(\text{picnómetro})} = \frac{M_1}{M_1 - (M_{2b} - M_{3b})} \times \rho_w \quad (4.2)$$

Onde:

ρ - massa volúmica do agregado [kg/m^3];

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

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

M_{2a} - massa do cesto metálico com o agregado saturado, imerso em água [kg];

M_{2b} - massa do balão com o agregado e água, até ao traço de referência [kg];

M_{3a} - massa do cesto metálico vazio, imerso em água [kg];

M_{3b} - massa do balão com água, até ao traço de referência [kg].

A determinação da absorção de água obteve-se através da expressão (4.3), utilizando a massa do agregado saturado com a superfície seca e a massa do agregado seco em estufa a uma temperatura de 110 ± 5 °C, após um período de 24 h.

$$A = \frac{100 \times (M_1 - M_4)}{M_4} \quad (4.3)$$

Onde:

A - absorção de água do agregado [%];

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

M_4 - massa do agregado seco em estufa [kg].

O Quadro 4.5 apresenta os resultados obtidos para a massa volúmica e para a absorção de água de todos os agregados utilizados nas misturas produzidas. A massa volúmica dos betumes 35/50 e BT 35/50 foi facultada pela CEPISA e é de $1040 \text{ kg}/\text{m}^3$.

Quadro 4.5 - Massa volúmica e absorção de água dos agregados

Agregado	Massa volúmica, ρ [kg/m^3]	Absorção de água, A [%]
Cal hidráulica	2810	—
Pó de pedra	2640	0,55
Brita 3/6	2650	1,0
Brita 5/15	2610	1,0
Material fresado	2410	—

4.3 Determinação da composição das misturas betuminosas

Neste estudo foram produzidas três tipos de misturas, como já referido, uma mistura betuminosa a quente, sendo a mistura de referência, e duas misturas betuminosas com betumes temperados, uma delas com incorporação de 30 % de material fresado, dado o seu interesse ambiental. No Quadro 4.6 pode ver-se a nomenclatura atribuída a cada mistura betuminosa.

Quadro 4.6 - Designação e descrição das misturas betuminosas produzidas em laboratório

Tipo de mistura	Designação	Descrição
Mistura betuminosa a quente	MQ	Mistura betuminosa produzida com agregados naturais e betume 35/50
Mistura betuminosa com betume temperado	MT	Mistura betuminosa produzida com agregados naturais e betume BT 35/50
Mistura betuminosa com betume temperado e incorporação de 30 % de material fresado	MT30	Mistura betuminosa produzida com 70 % de agregados naturais, 30 % de material fresado e betume BT 35/50

4.3.1 Composição granulométrica das misturas betuminosas

Como mencionado na subsecção 4.2.4, o fuso granulométrico adotado é o de uma mistura betuminosa densa a quente para camadas de desgaste, segundo as especificações espanholas, e correspondente ao fuso AC 16 Surf D. A escolha de um fuso para misturas a quente deve-se à inexistência de fusos granulométricos para misturas temperadas e, portanto, a composição granulométrica das três misturas produzidas foi realizada tendo em conta este fuso.

O Quadro 4.7 e a Figura 4.6 apresentam a granulometria relativa às três misturas betuminosas estudadas, juntamente com os limites do fuso granulométrico. É de notar que as misturas MQ e MT têm a mesma granulometria, pois a composição em termos de agregados é a mesma, apenas varia o betume usado.

Quadro 4.7 - Granulometria das misturas betuminosas produzidas em laboratório

Abertura dos peneiros [mm]	% Acumulada de material passado			
	MQ	MT	MT30	Fuso AC16 Surf D
22	100	100	100	100
16	100	100	99	90 - 100
8	78	78	78	64 - 79
4	48	48	48	44 - 59
2	30	30	31	31 - 46
0,500	17	17	19	16 - 27
0,250	13	13	14	11 - 20
0,063	7	7	7	4 - 8

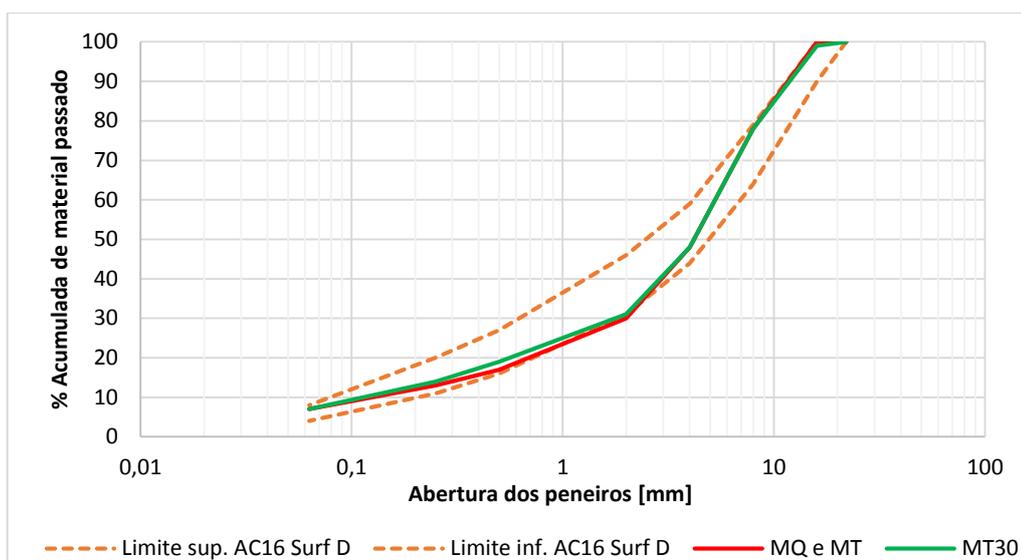


Figura 4.6 - Curvas granulométricas das misturas betuminosas

Verifica-se, da análise da granulometria das misturas, que a mistura betuminosa a quente e a mistura betuminosa com betume temperado não cumprem o fuso no peneiro com abertura de 2 mm, no entanto como esse desvio é apenas de uma unidade e não foi possível enquadrar de outra forma as misturas no fuso, considerou-se aceitável este ligeiro desvio.

A percentagem de cada agregado utilizado para a produção das misturas betuminosas apresenta-se no Quadro 4.8.

Quadro 4.8 - Composição das três misturas betuminosas (% de agregado)

Agregado	MQ e MT	MT30
Cal hidráulica	3	3
Pó de pedra	45	25
Brita 3/6	17	17
Brita 5/15	35	25
Material fresado	—	30

4.3.2 Estimativa do teor de betume

O cálculo da quantidade de betume inicial das misturas betuminosas foi efetuado com base na expressão empírica (4.4) que tem em conta a superfície específica dos agregados.

$$Pb_R = 0,035 \times A + 0,045 \times B + K \times p_{200} + F \quad (4.4)$$

Onde:

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

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

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

K - constante em função da quantidade de material que passa no peneiro nº 200;

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

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

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

p₂₀₀ - percentagem de agregados de dimensão inferior e 0,075 mm;

F - fator de absorção dos agregados (entre 0 e 2 %), na falta de informação utiliza-se F = 0,7 %.

Para a mistura betuminosa com betume temperado e incorporação de material fresado, o teor de betume novo a adicionar à mistura (Pb_N), considera o teor de betume envelhecido que já está presente no material fresado. Desta forma, deve-se subtrair à percentagem de betume obtida pela expressão (4.4) a percentagem de betume envelhecido incluído na mistura betuminosa fresada, correspondente ao valor obtido pela extração de betume do RAP na mufla, de acordo com a taxa de reciclagem da mistura em causa. Através da expressão (4.5) determina-se o teor de betume novo que vai ser adicionado, expresso como percentagem da massa total da mistura.

$$Pb_N = Pb_R - \frac{Pb_{MBF} \times TR}{100} \quad (4.5)$$

Onde:

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

Pb_R - percentagem de betume em relação à massa total da mistura, obtida pela expressão (4.4);

Pb_{MBF} - percentagem de betume envelhecido da mistura betuminosa fresada;

TR - taxa de reciclagem.

Os resultados obtidos para as percentagens de betume estão apresentados no Quadro 4.9.

Quadro 4.9 - Percentagens de betume a adicionar às misturas

Misturas betuminosas	Pb _R [%]	Pb _N [%]
MQ e MT	5,4	—
MT30	5,4	3,9

O cálculo da percentagem de betume novo (Pb_N), pela expressão (4.5), considera a percentagem de betume envelhecido como sendo um betume novo, o que não se verifica. Devido a este facto, calculou-se a percentagem de ligante final (betume envelhecido + betume novo) do material fresado, correspondendo a um novo valor de Pb_R e em seguida recalculou-se o valor mais realista de Pb_N. Note-se que para misturas betuminosas com baixas taxas de material fresado a consideração do facto referido não é muito relevante.

Batista (2006) apresenta algumas expressões simples para estimar as características do ligante final, tomando como referência a *Association Mondiale de la Route*. As expressões referidas permitem estimar a penetração do ligante final a 25 °C, a temperatura de amolecimento pelo método anel e bola e a viscosidade. Neste trabalho adotou-se a expressão alusiva à penetração, representada na expressão (4.6).

$$\log(\text{pen}_R) = TRb \times \log(\text{pen}_F) + (1 - TRb) \times \log(\text{pen}_N) \quad (4.6)$$

$$TRb = \frac{TR \times Pb_F}{Pb_R} \quad (4.7)$$

Onde:

pen_R - penetração do ligante final da mistura reciclada [0,1 mm];

TRb - taxa de reciclagem de betume, determinada pela expressão (4.7);

pen_F - penetração do betume envelhecido do material fresado [0,1 mm];

pen_N - penetração do betume novo [0,1 mm];

TR - taxa de reciclagem;

Pb_F - percentagem de betume (ligante envelhecido) do material fresado [%];

Pb_R - percentagem de betume (ligante final) da mistura betuminosa reciclada [%].

Visto que em Portugal se utiliza frequentemente betumes com gamas de penetração entre os 35 e 50 x 10⁻¹ mm, adotou-se como penetração do ligante final (pen_R) da mistura reciclada o valor de 30 x 10⁻¹ mm, em concordância com Batista (2006). No Quadro 4.10 apresenta-se um resumo dos dados usados e dos resultados para calcular o valor da percentagem de betume novo em relação à massa total da mistura (Pb_N), seguindo a sequência de expressões utilizadas.

Quadro 4.10 - Resultados do estudo de penetração do ligante final da mistura MT30

Expressão utilizada	Dados necessários	Resultados
(4.6)	$\text{pen}_R = 30 \times 10^{-1} \text{ mm}$	TRb = 31 %
	$\text{pen}_F = 11 \times 10^{-1} \text{ mm}$	
	$\text{pen}_N \text{ (BT 35/50)} = 47 \times 10^{-1} \text{ mm}$	
(4.7)	TR = 30 %	$Pb_R = 4,9 \%$
	$Pb_F = 5,0 \%$	
	TRb = 31 %	
(4.5)	$Pb_R = 4,9 \%$	$Pb_N = 3,4 \%$
	$Pb_{MBF} = Pb_F = 5,0 \%$	
	TR = 30 %	

Da análise do Quadro 4.9, conclui-se que o teor de betume estimado para a mistura betuminosa a quente e para a mistura betuminosa com betume temperado é de 5,4 %, já para a mistura betuminosa com betume temperado e incorporação de material fresado o teor de betume estimado é de 3,4 %, segundo o Quadro 4.10. De forma a confirmar estes valores, obtidos teoricamente, foram produzidas misturas com margens de $\pm 0,5$ % do valor estimado, com o objetivo de avaliar a quantidade de betume a adicionar às misturas, através de observação visual.

Neste sentido, para a mistura betuminosa a quente foram produzidas misturas com 4,9 % de betume 35/50 verificando-se demasiado seca, com 5,4 % observando-se o total envolvimento dos agregados com o betume e uma boa aderência entre eles e com 5,9 % havia escorrência de betume. A mistura betuminosa com betume temperado BT 35/50 apresentou um bom aspeto com 4,9 % de betume, sendo que com 5,4 % e com 5,9 % observou-se escorrimento de ligante. Por fim, para a mistura betuminosa com betume temperado e incorporação de material fresado produziu-se uma mistura com 3,4 % de betume temperado, verificando-se claramente uma aparência bastante seca sem o devido revestimento dos agregados. De seguida, realizou-se uma mistura aumentando o teor de betume para 3,9 %. Esta mistura apresentou novamente um aspeto seco optando-se por fabricar uma mistura com 4,4 % que revelou um bom revestimento dos agregados e uma boa adesividade dos mesmos. Assim, optou-se por efetuar uma mistura com um teor de betume temperado de 4,9 % verificando-se uma pequena quantidade de excesso de betume. No caso da mistura betuminosa com betume temperado e incorporação de material fresado foi abandonada a hipótese de 3,4 %, prosseguindo-se o trabalho com as restantes três percentagens referidas.

4.3.3 Determinação do teor ótimo de betume

A escolha do teor ótimo de betume a utilizar em cada mistura betuminosa foi efetuada, tendo em conta parâmetros definidos no Caderno de encargos das Estradas de Portugal (EP, 2012) e no *Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes* (PG-3, OC 29/2011). Os parâmetros avaliados foram a porosidade, que compreende o cálculo da baridade máxima teórica, e o ensaio *Marshall*.

4.3.3.1 Baridade máxima teórica

O cálculo da baridade máxima teórica foi realizado através do método matemático, presente na norma EN 12697-5:2002, *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 5: Determination of the maximum density*, procedimento C. A determinação deste parâmetro é dada pela expressão (4.8), cujos resultados para cada mistura betuminosa com determinado teor de betume estão no Quadro 4.11.

$$\rho_{mc} = \frac{100}{\left(\frac{p_{a1}}{\rho_{a1}}\right) + \left(\frac{p_{a2}}{\rho_{a2}}\right) + \dots + \left(\frac{p_b}{\rho_b}\right)} \quad (4.8)$$

Nota: $p_{a1} + p_{a2} + \dots + p_b = 100 \%$

Onde:

ρ_{mc} - baridade máxima teórica da mistura betuminosa [kg/m^3];

p_{a1} - percentagem do agregado 1 na mistura [%];

ρ_{a1} - massa volúmica do agregado 1 [kg/m^3];

p_{a2} - percentagem do agregado 2 na mistura [%];

ρ_{a2} - massa volúmica do agregado 2 [kg/m^3];

p_b - percentagem do ligante na mistura [%];

ρ_b - massa volúmica do ligante [kg/m^3].

Quadro 4.11 - Baridade máxima teórica das misturas betuminosas

Misturas betuminosas	% De betume	Baridade máxima teórica [kg/m^3]
MQ e MT	4,9	2450
	5,4	2430
	5,9	2420
MT30	3,9	2410
	4,4	2410
	4,9	2390

4.3.3.2 Baridade, Porosidade, VMA e VFB

Para a determinação das propriedades fundamentais das misturas betuminosas apresentadas neste estudo procedeu-se ao fabrico de um conjunto de 27 provetes cilíndricos, três por cada teor de betume das três misturas betuminosas, com cerca de 100 mm de diâmetro e altura variável.

A produção dos provetes foi realizada tendo em conta o estudo de composição presente no Quadro 4.8. Para tal, foram utilizados moldes *Marshall*, produzindo manualmente, aproximadamente, 1100 g de mistura para cada provete. Os agregados e o betume 35/50, para a mistura betuminosa a quente, foram pré-aquecidos em estufa a uma temperatura superior a 165 °C e a compactação foi realizada a uma temperatura superior a 155 °C, conforme indicações do fornecedor (CEPSA). Para as misturas betuminosas com betumes temperados (MT e MT30) a temperatura de pré-aquecimento dos agregados e do betume BT 35/50 foi superior a 125 °C e para a compactação foi superior a 115 °C. É de salientar que nas misturas betuminosas MT30, os agregados naturais foram misturados primeiramente com o betume temperado e só depois se adicionou o material fresado, devido à dificuldade de revestir na totalidade os agregados naturais.

A compactação dos provetes cilíndricos realizou-se com o compactador de impacto, conforme Figura 4.7, segundo a norma EN 12697-30:2004, *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 30: Specimen preparation by impact compactor*, aplicando 50 pancadas em cada face dos provetes. Os 27 provetes que resultaram para a determinação da baridade apresentam-se na Figura 4.8.

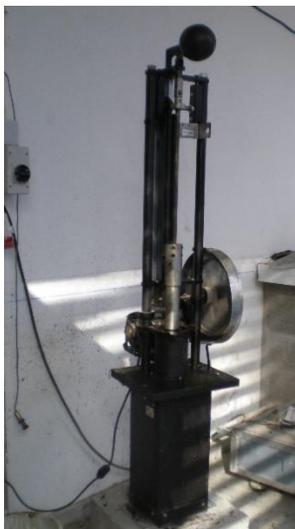


Figura 4.7 - Compactador de impacto (DECA-UBI)



Figura 4.8 - Provetes cilíndricos produzidos

A baridade dos provetes produzidos determinou-se segundo a norma EN 12697-6:2003, *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 6: Determination of bulk density of bituminous specimens, procedure B: Bulk density - SSD*. Esta norma determina a baridade dos provetes cilíndricos segundo a expressão (4.9), apresentando-se na Figura 4.9 os resultados obtidos.

$$\rho_{bssd} = \frac{M_1}{M_3 - M_2} \times \rho_w \quad (4.9)$$

Onde:

ρ_{bssd} - baridade saturada com superfície seca do provete [kg/m^3];

M_1 - massa do provete seco [kg];

M_2 - massa do provete saturado, imerso em água [kg];

M_3 - massa do provete saturado com superfície seca [kg];

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

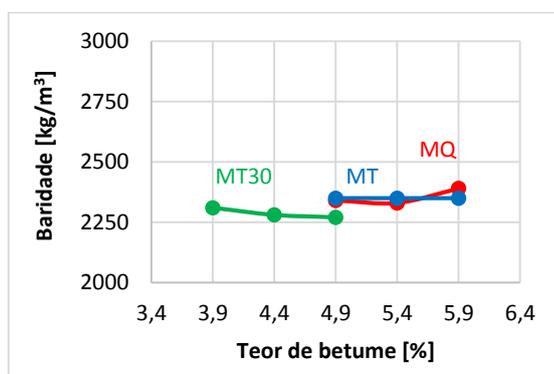


Figura 4.9 - Baridade saturada com superfície seca dos provetes cilíndricos

Tendo em conta a baridade máxima teórica das misturas betuminosas, para cada teor de betume utilizado, verifica-se o cumprimento da baridade saturada com superfície seca, uma vez que se situa abaixo dos máximos valores, de acordo com os resultados obtidos.

Sabendo a baridade saturada com superfície seca dos provetes cilíndricos e a baridade máxima teórica é possível calcular a porosidade das misturas betuminosas produzidas. A porosidade das misturas betuminosas foi calculada por meio do método matemático, segundo a norma EN 12697-8:2003, *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 8: Determination of void characteristics of bituminous specimens*. A expressão (4.10) determina a porosidade das misturas e as expressões (4.11) e (4.12) determinam os vazios na mistura de agregados (VMA) e os vazios nos agregados cheios de betume (VFB), respetivamente. Na Figura 4.10 e 4.11 apresentam-se os resultados obtidos.

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

Onde:

V_m - porosidade da mistura [%];

ρ_m - baridade máxima teórica da mistura [kg/m³];

ρ_b - baridade saturada com superfície seca dos provetes [kg/m³].

$$VMA = V_m + B \times \rho_b / \rho_B \quad (4.11)$$

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

Onde:

VMA - vazios na mistura de agregados [%];

VFB - vazios nos agregados cheios de betume [%];

V_m - porosidade da mistura [%];

B - Conteúdo de ligante, em 100 % da mistura [%];

ρ_b - baridade saturada com superfície seca dos provetes [kg/m^3];

ρ_B - massa volúmica do ligante [kg/m^3].

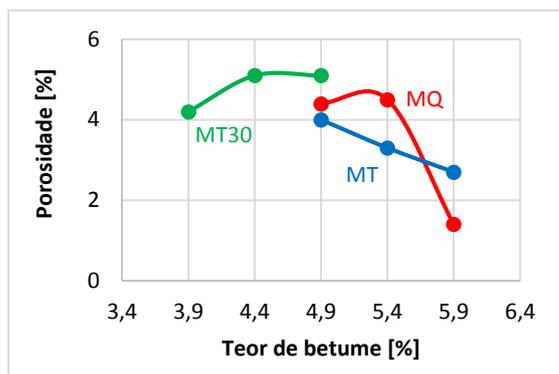


Figura 4.10 - Porosidade das misturas betuminosas

Comparando, entre as três misturas betuminosas, os resultados obtidos para as porosidades, observa-se que a mistura betuminosa a quente de referência obtém os maiores valores para as percentagens de 4,9 e 5,4 %, situando-se acima dos 4 %. A mistura betuminosa com betume temperado, relativamente à mistura a quente consegue valores de porosidade menores para os dois teores de betume mais baixos, ao contrário da mistura betuminosa com betume temperado e incorporação de material fresado que tem resultados, para todos os teores de betume, acima dos 4 %.

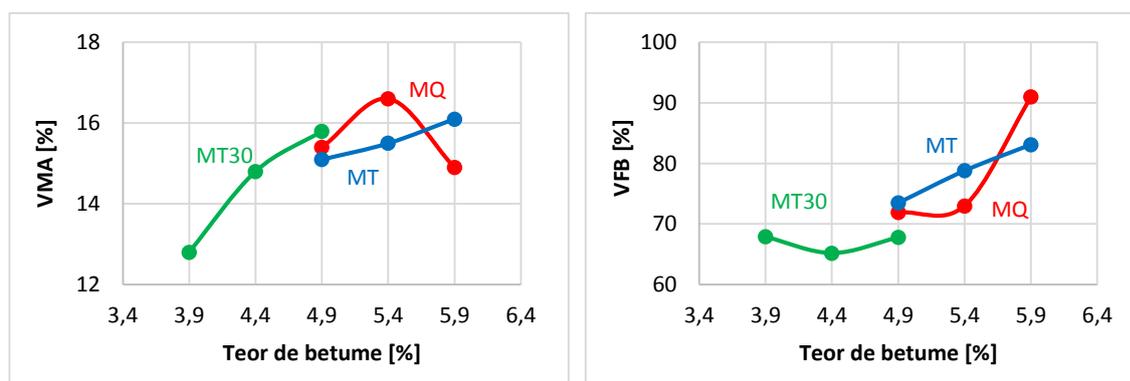


Figura 4.11 - VMA e VFB das misturas betuminosas

Os vazios na mistura de agregados (VMA), no caso da mistura a quente, situam-se entre os 14 e os 16 %, verificando-se um pico acima do 16 % para 5,4 % de betume. Comparativamente com a mistura betuminosa com betume temperado, esta apresenta valores entre os 15 e os 16 %,

sendo mais coerente entre os três teores de betume. Na mistura betuminosa com betume temperado e incorporação de material fresado, os vazios na mistura de agregados têm uma evolução crescente, mais significativa do que as misturas MQ e MT, consoante o aumento de teores de betume temperado.

A mistura betuminosa a quente, para o teor de 5,9 % de betume obtém um valor elevado nos vazios dos agregados cheios de betume (VFB), acima dos 90 %, sendo que para os restantes teores de betume, situam-se ligeiramente acima dos 70 %, correspondendo a uma evolução conforme os teores de betume, tal como na mistura betuminosa com betume temperado. Contrariamente, a mistura betuminosa com betume temperado e incorporação de material fresado apresenta os menores valores para os vazios nos agregados cheios de betume, inferiores a 70 % e muito próximos entre si.

4.3.3.3 Ensaio *Marshall*

Por último, realizou-se o ensaio *Marshall*, visto ter requisitos para a determinação do teor ótimo de betume. O ensaio *Marshall* tem como referência a norma EN 12697-34:2004, *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 34: Marshall test*.

Os provetes utilizados para proceder ao ensaio *Marshall* foram os mesmos que os produzidos para a determinação das propriedades fundamentais, ensaiando os 27 provetes. O principal objetivo deste ensaio é quantificar a resistência mecânica e a deformação sofrida por uma mistura betuminosa, compactada em laboratório, sob determinadas condições.

O ensaio *Marshall* foi realizado recorrendo ao equipamento ilustrado na Figura 4.12, na empresa InfraLab. Previamente, os provetes foram sujeitos a um banho de imersão em água a 60 °C durante cerca de 50 minutos, sendo posteriormente colocados, um a um, entre duas meias canas de aço, fazendo-se a aproximação dos pratos da máquina por manipulação do *software*.



Figura 4.12 - Câmara de banho de imersão e prensa de compressão *Marshall* (InfraLab)

A força de compressão é aplicada diametralmente, ou seja, o provete deforma-se lateralmente. À medida que a carga é aplicada o seu valor e o da respetiva deformação são medidos por meio

do LVDT. Na Figura 4.13 estão presentes os resultados de estabilidade e deformação em função do teor de betume, para as três misturas produzidas, obtidos do ensaio *Marshall*.

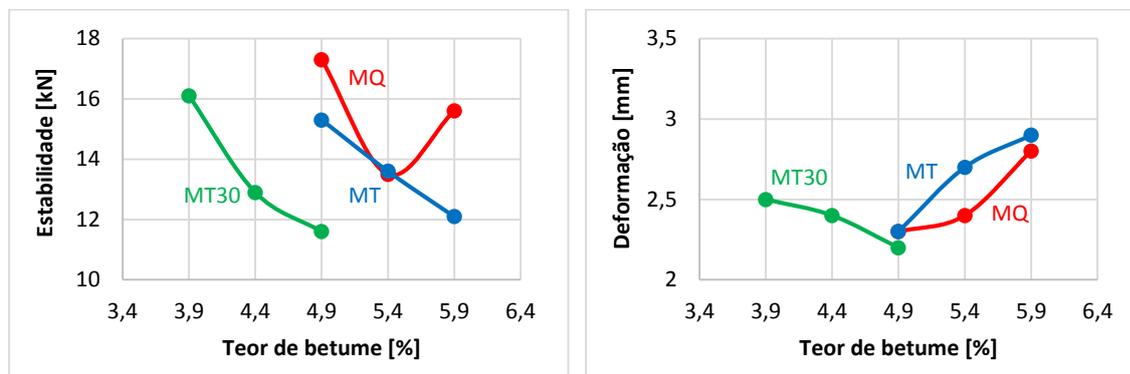


Figura 4.13 - Estabilidade e deformação do ensaio *Marshall*

Analisando os gráficos da mistura betuminosa a quente, verifica-se que a mistura com 4,9 % de betume tem maior estabilidade correspondendo à mistura com menor deformação. A mesma situação ocorre na mistura betuminosa com betume temperado, observando-se que à medida que o teor de betume temperado aumenta a estabilidade diminui e a deformação aumenta. Na mistura betuminosa com betume temperado e incorporação de material fresado acontece o inverso das outras duas misturas, verificando-se uma diminuição de deformação quando a estabilidade também diminui.

4.3.3.4 Escolha final do teor ótimo de betume

Não existindo valores especificados para misturas betuminosas com betumes temperados e para as mesmas com incorporação de material fresado, no Quadro 4.12 apresentam-se os requisitos que o Caderno de Encargos das Estradas de Portugal, S.A. e o *Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes* (PG-3) apresentam para as misturas betuminosas a quente aplicadas em camadas de desgaste, sendo estes requisitos utilizados para a escolha do teor final de betume das três misturas em estudo.

Tendo em conta que as misturas betuminosas deste trabalho foram produzidas conforme uma mistura AC 16 Surf D, de acordo com as especificações espanholas, os requisitos a adotar no PG-3 são os correspondentes a esta mesma mistura, adotando a categoria de tráfego T1 e T2 uma vez que é onde se empregam mais os betumes 35/50. No Caderno de Encargos das Estradas de Portugal, S.A. fez-se a correspondência com uma mistura AC 14 Surf (BB), pois é a que mais se aproxima do tipo de misturas produzidas, adotando os requisitos da mesma.

Averiguando cada um dos resultados dos parâmetros analisados acima, apresenta-se no Quadro 4.13 um resumo dos resultados obtidos, em termos de valores, para posteriormente comparar com os requisitos pretendidos. Note-se que os valores dos requisitos estão estabelecidos para

misturas betuminosas a quente e que é normal verificarem-se discrepâncias nos resultados obtidos para as misturas betuminosas com betume temperado, com e sem material fresado.

Quadro 4.12 - Requisitos para as características da mistura betuminosa a quente

Requisitos/Propriedades	Caderno de Encargos das Estradas de Portugal	Especificações Técnicas Espanholas (PG-3, OC 29/2011)
Porosidade [%]	3 - 5	4 - 6
Vazios na mistura de agregados - VMA [%]	min 14	—
Estabilidade <i>Marshall</i> [kN]	7,5 - 15	> 12,5
Deformação <i>Marshall</i> [mm]	2 - 4	2 - 3,5

Quadro 4.13 - Resultados das características analisadas

Misturas betuminosas	% De betume	Porosidade [%]	Vazios na mistura de agregados - VMA [%]	Estabilidade <i>Marshall</i> [kN]	Deformação <i>Marshall</i> [mm]
MQ	4,9	4,4	15,4	17,3	2,3
	5,4	4,5	16,6	13,5	2,4
	5,9	1,4	14,9	15,6	2,8
MT	4,9	4,0	15,1	15,3	2,3
	5,4	3,3	15,5	13,6	2,7
	5,9	2,7	16,1	12,1	2,9
MT30	3,9	4,2	12,8	16,1	2,5
	4,4	5,1	14,8	12,9	2,4
	4,9	5,1	15,8	11,6	2,2

No Quadro 4.13 estão representados com cor vermelha os valores que não cumprem os requisitos do Quadro 4.12, observando-se que para a mistura betuminosa a quente, o teor de betume de 5,4 % é o que verifica todos os requisitos de todas as características e portanto foi o teor de betume escolhido. Na mistura betuminosa com betume temperado, verifica-se o não cumprimento para 5,4 e 5,9 % na porosidade e para 4,9 e 5,9 % na estabilidade *Marshall*. No entanto, considerou-se que é aceitável o valor de 15,3 kN de estabilidade *Marshall*, uma vez que se aproxima do limite de 15 kN do Caderno de Encargos e cumpre o requisito (> 12,5 kN) do PG-3, por isso foi escolhido o teor de betume BT de 4,9 % para esta mistura. Para a mistura betuminosa com betume temperado e incorporação de material fresado não se verifica o cumprimento da porosidade para 4,4 e 4,9 % e da estabilidade *Marshall* para 3,9 e 4,9 %. Neste caso escolheu-se o teor de betume BT de 4,4 %, pois apenas não satisfaz os limites de porosidade do Caderno de Encargos em 0,1 %. Os teores ótimos de betume escolhidos para cada mistura estão representados a cor verde no Quadro 4.13.

4.3.4 Ensaios de caracterização das misturas betuminosas

De forma a conhecer o comportamento das misturas betuminosas produzidas neste estudo, esta subsecção engloba os ensaios de caracterização das mesmas, tendo em conta a composição granulométrica e o teor ótimo de betume escolhido para cada mistura betuminosa.

De seguida, descrevem-se os ensaios realizados para a caracterização das misturas à tração indireta em compressão diametral e à sensibilidade à água, assim como o ensaio que caracteriza o comportamento das misturas quanto à resistência à fadiga.

4.3.4.1 Ensaio de tração indireta em compressão diametral

O ensaio de tração indireta em compressão diametral realizou-se de acordo com a norma EN 12697-26:2004, *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 26: Stiffness*, anexo C, utilizando o equipamento NAT da UBI, já ilustrado na Figura 3.10. Este ensaio, que utiliza provetes cilíndricos, é simples e de aplicação frequente na caracterização do comportamento mecânico de misturas betuminosas, nomeadamente na caracterização da rigidez.

A produção das misturas foi efetuada atendendo ao estudo de composição presente no Quadro 4.8, fabricando, da mesma forma que foi apresentado para o cálculo das propriedades fundamentais, três provetes para cada teor ótimo de betume das três misturas betuminosas, perfazendo 9 provetes cilíndricos, com cerca de 100 mm de diâmetro e altura variável.

O ensaio de tração indireta consiste na aplicação de duas forças diametraais e opostas num provete, originando tensões de tração uniformes e perpendiculares a esse diâmetro. O ensaio é realizado em condições de tensão controlada, avaliando a deformação resultante dos sucessivos impulsos de carga, controlados pelo *software* do equipamento. O programa admite simplificações para o cálculo do estado de tensão dentro do provete, e conseqüentemente, para a avaliação da carga que lhe é aplicada (Batista, 2004), considerando que o provete está submetido a um estado de tensão plana, o comportamento é elástico e linear, o material é homogéneo e isotrópico, o coeficiente de *Poisson* é constante e conhecido (assumindo 0,35 para uma temperatura de 20 °C) e o carregamento aplicado corresponde a uma carga de cutelo.

O provete é colocado entre duas barras de aço, as quais têm uma das faces côncavas ajustando-se perfeitamente ao provete que fica apoiado na parte côncava da barra inferior e o carregamento é transmitido por meio da barra superior. Posteriormente, coloca-se um sistema de apoio aos transdutores de deslocamento do tipo LVDT, conforme Figura 4.14, de forma a ficarem diametralmente opostos. Na Figura 4.15 apresenta-se uma representação esquemática do equipamento do ensaio.

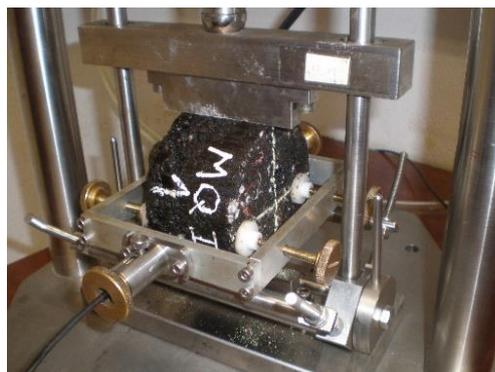


Figura 4.14 - Ensaio de tração indireta em compressão diametral no NAT (DECA-UBI)

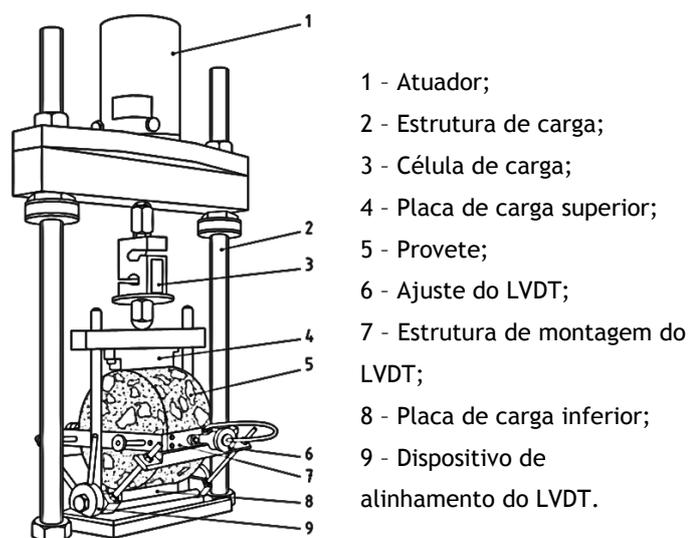


Figura 4.15 - Representação esquemática do equipamento para realização do ensaio de tração indireta (adaptado da EN 12697-26)

O módulo de rigidez é determinado com base na aplicação de 5 cargas repetidas, precedidas de um pré-carregamento, de 10 repetições de carga, que tem a função de ajustar o sistema de aplicação de carga ao provete. Cada um dos provetes cilíndricos foi ensaiado segundo duas direções diametrais e ortogonais.

A tração no provete é gerada por aplicação de cargas repetidas no plano perpendicular à direção do carregamento e ao longo do plano diametral vertical, sendo que este estado de tensão induz a deformação do provete, como se vê na Figura 4.16a.

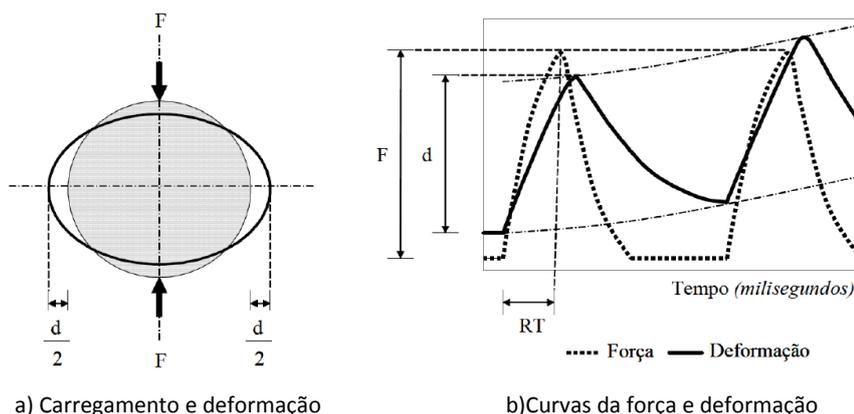


Figura 4.16 - Princípio de carregamento e deformação do provete no ensaio de tração indireta (Neves e Correia, 2006)

No decorrer do ensaio, é registada a curva da deformação medida no provete, segundo a direção diametral perpendicular ao plano de atuação da carga e a curva correspondente ao impulso da força, conforme Figura 4.16b. O impulso da força é caracterizado pela amplitude (F) e pelo tempo de crescimento da carga (RT - *Rise Time*), sendo este o período de tempo decorrido desde o instante de aplicação da força até ao instante em que se regista o respetivo valor máximo e está relacionado com a frequência de aplicação. Segundo Neves e Correia (2006), a bibliografia recomenda um tempo de crescimento da carga compreendido entre valores de 120 e 125 milissegundos, correspondente a um carregamento sinusoidal com frequência de 2,5 Hz. O tempo de crescimento da carga recomendado pela norma EN 12697-26 é de 124 ± 4 milissegundos, tendo sido utilizado o valor de 124 milissegundos no presente estudo.

Os 9 provetes produzidos para o ensaio de tração indireta estão apresentados na Figura 4.17, depois da realização do mesmo que foi efetuado após um dia de cura à temperatura de $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ e cujos resultados se apresentam no Quadro 4.14 para as três misturas betuminosas.



Figura 4.17 - Provetes cilíndricos após ensaio de tração indireta em compressão diametral

Os resultados apresentados dizem respeito à média dos três provetes produzidos para cada teor de betume. A mistura betuminosa a quente mostrou ter o maior módulo de rigidez, seguida da mistura betuminosa com betume temperado e com incorporação de material fresado, sendo que a mistura betuminosa com betume temperado obteve o menor valor.

Quadro 4.14 - Resultados do ensaio de tração indireta em compressão diametral

Misturas betuminosas	% De betume	Módulo de rigidez [MPa]
MQ	5,4	5021
MT	4,9	3611
MT30	4,4	4750

4.3.4.2 Ensaio de sensibilidade à água

A caracterização da sensibilidade à água das misturas betuminosas foi realizada segundo a norma EN 12697-12:2003, *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 12: Determination of the water sensitivity of bituminous specimens*. Este ensaio tem como objetivo comparar os valores médios de resistência à tração em compressão diametral através de dois grupos de três provetes cilíndricos previamente mantidos em diferentes condições.

A produção dos provetes cilíndricos foi efetuada de forma semelhante à dos provetes produzidos para as propriedades fundamentais, com cerca de 100 mm de diâmetro. A separação por grupos teve em conta a semelhança da baridade entre provetes para cada grupo. Neste estudo, tal como também refere Batista *et al.* (2008), foram estabelecidas diferenças máximas de 30 kg/m³ para as baridades médias. No Quadro 4.15 apresentam-se a baridade média dos grupos de provetes.

Quadro 4.15 - Baridade média dos grupos de provetes

Misturas betuminosas	Baridade média [kg/m ³]	
	“a seco”	imersos
MQ	2381	2366
MT	2411	2331
MT30	2382	2349

O primeiro grupo de provetes (“a seco”) foi acondicionado ao ar a 20 ± 5 °C e o segundo grupo (imersos) foi acondicionado em banho de água a 40 ± 1 °C, durante um período de 68 a 72 h. No entanto, a norma indica que os provetes do segundo grupo sejam previamente submetidos a vácuo em água a 20 ± 5 °C e mantidos durante 30 ± 5 minutos com uma pressão absoluta de $6,7 \pm 0,3$ kPa. Na Figura 4.18 apresentam-se os provetes submetidos a vácuo que posteriormente foram levados ao banho de água, isto para garantir que a água penetrasse de forma adequada nos poros dos provetes. A norma também recomenda que seja efetuada uma verificação do volume dos provetes após a aplicação do vácuo, não devendo haver um aumento de volume dos provetes superior a 2 %.

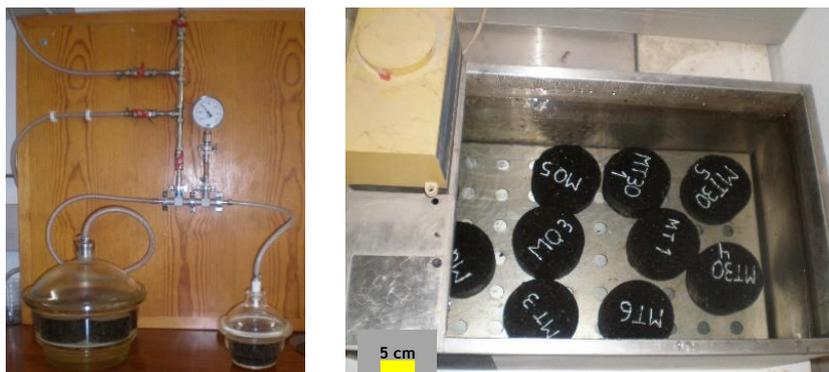


Figura 4.18 - Provetes do segundo grupo submetidos a vácuo em água e posteriormente em banho de água (DECA-UBI)

Após o acondicionamento dos grupos de provetes, os mesmos foram sujeitos a ensaios para determinar a resistência à tração indireta, a uma temperatura de ensaio na gama de 5 a 25 °C. A norma EN 12697-12 recomenda que seja adotada uma temperatura de ensaio de 25 °C, de forma a ser obtida a influência máxima da adesividade do ligante e a minimizar a influência dos agregados partidos na linha de rotura do provete. Nota-se, no entanto, que a norma EN 13108-20, referente aos ensaios tipo incluídos pela marcação CE de misturas betuminosas, preconiza uma temperatura de 15 °C para esse efeito. Neste sentido, e tendo em conta estudos realizados por outros autores (Batista *et al.*, 2008), a temperatura utilizada neste estudo e tida como a mais indicada é de 15 °C. Após retirar os provetes do banho de água a 40 °C, os mesmos foram sujeitos a um banho de água a 15 °C durante 2 horas. Os provetes “a seco” depois de serem mantidos a 20 ± 5 °C foram colocados num ambiente seco a 15 °C durante mais 2 horas.

De seguida, os dois grupos de provetes foram ensaiados à compressão diametral, como se vê na Figura 4.19, de acordo com a norma EN 12697-23:2003, *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 23: Determination of the indirect tensile strength of bituminous specimens*, e com uma aplicação de carga a velocidade constante de 50 ± 2 mm/min. Este ensaio foi realizado nos laboratórios da InfraLab.



Figura 4.19 - Ensaio de tração indireta em compressão diametral (InfraLab)

A resistência conservada em tração indireta (ITSR - *Indirect Tensile Strength Ratio*) é obtida através da expressão (4.13).

$$ITSR = 100 \times \frac{ITS_w}{ITS_d} \quad (4.13)$$

Onde:

ITSR - resistência conservada em tração indireta [%];

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

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

Para os dois grupos de provetes, a resistência à tração indireta (ITS - *Indirect Tensile Strength*) é dada pela expressão (4.14).

$$ITS = \frac{2P}{\pi D H} \quad (4.14)$$

Onde:

ITS - resistência à tração indireta [kPa];

P - resistência máxima média [kN];

D - diâmetro do provete [mm];

H - altura do provete [mm].

Os resultados obtidos neste ensaio apresentam-se no Quadro 4.16, correspondendo à média dos três provetes pertencentes a cada grupo.

Quadro 4.16 - Resultados do ensaio de sensibilidade à água

Misturas betuminosas	% De betume	ITS [kPa]		ITSR [%]
		“a seco”	imersos	
MQ	5,4	2370	2300	97
MT	4,9	2020	1950	97
MT30	4,4	2860	2920	100

O Caderno de Encargos das Estradas de Portugal, S.A. não referencia qualquer requisito para o ensaio de sensibilidade à água, no entanto o PG-3 (OC 29/2011) refere um valor de resistência conservada superior a 85 % para misturas betuminosas a quente aplicadas em camadas de desgaste. As misturas betuminosas a quente e com betume temperado cumprem este valor, mas a mistura betuminosa com betume temperado e incorporação e material fresado apresentou um valor final de 100 %, devendo-se à forte densidade da mistura que não permite a penetração de água no provete, não possibilitando a sua danificação.

Neste ensaio de tração indireta para caracterizar a sensibilidade à água, a norma EN 12697-23 também classifica a rotura que os provetes ensaiados apresentam, tal como indica a Figura 4.20.

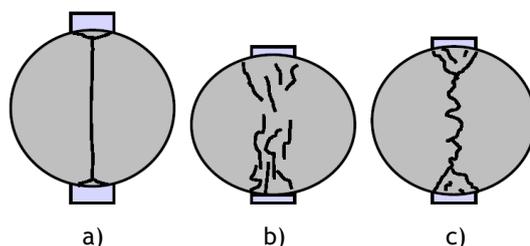


Figura 4.20 - Tipos de rotura (EN 12697-23)

A classificação atribuída a cada tipo define-se da seguinte forma:

- a) “Rotura de tração clara” - O provete quebra suavemente durante o curso do ensaio numa direção diametral, possivelmente com exceção de pequenas secções triangulares na proximidade da zona de contacto das tiras de pressão.
- b) “Deformação” - Proвете sem uma linha de rotura claramente visível (reconhecível).
- c) “Combinação” - Proвете com uma linha de rotura limitada e uma área de maior deformação na proximidade da zona de contacto das tiras de pressão.

Nos provetes ensaiados apenas foi possível observar roturas do tipo a) e do tipo b), podendo observar-se nos dois provetes exemplificativos da Figura 4.21.



Figura 4.21 - Provetes com roturas do tipo a) e b)

4.3.4.3 Ensaio de resistência à fadiga

Como já mencionado anteriormente, o ensaio de resistência à fadiga utilizado neste estudo está de acordo com a norma EN 12697-24, anexo D, correspondente ao ensaio de flexão em quatro pontos de provetes prismáticos.

Os provetes resultaram da execução e compactação de lajetas produzidas em laboratório segundo o estudo de composição das misturas presente no Quadro 4.8 e para as percentagens de teor ótimo de betume obtidas.

Inicialmente o betume foi aquecido em estufa, a uma temperatura de cerca de 165 °C para o betume 35/50 e de cerca de 125 °C para o betume BT 35/50, sendo os agregados igualmente aquecidos, como se vê na Figura 4.22a. Posteriormente prepararam-se as quantidades necessárias de cada fração de agregado e de betume para o fabrico das misturas, efetuando a amassadura em três partes iguais, garantindo a homogeneidade da mistura do betume com os agregados, através de uma misturadora mecânica com uma haste rotativa, Figura 4.22b. Durante o processo de fabrico, as temperaturas foram mantidas.



Figura 4.22 - Processo de fabrico das misturas betuminosas (DECA-UBI)

Em seguida, a mistura foi colocada num molde de aço posicionado no exterior do laboratório, como se vê na Figura 4.23a, e compactada através de um cilindro de rolos utilizando vibração até se obter uma superfície plana, Figura 4.23b, resultando daí uma lajeta que depois foi cortada em vigas. Foram produzidas duas lajetas para cada mistura, perfazendo 85 kg por mistura, resultando num total de 36 vigas. Para a mistura a quente a compactação foi realizada com uma temperatura de aproximadamente 155 °C e para as misturas com betume temperado, a temperatura foi cerca de 115°C.



Figura 4.23 - Compactação das lajetas com o cilindro de rolos (DECA-UBI)

Depois de terminada a compactação e arrefecimento das misturas, as lajetas foram desmoldadas e cortadas, através de uma serra elétrica, com as dimensões exigidas pela norma EN 12697-24, optando-se por vigas com as dimensões aproximadas de 40 x 5 x 5 cm, Figura

4.24. Após a produção dos provetes prismáticos ou vigas, estes foram armazenados numa superfície plana durante 28 dias, em condições de temperatura e humidade favoráveis, até se poder proceder ao ensaio de resistência à fadiga.



Figura 4.24 - Serragem de lajeta e provetes prismáticos de ensaio (DECA-UBI)

Uma semana depois do fabrico dos provetes prismáticos, procedeu-se à determinação da baridade saturada com superfície seca para cada uma das vigas, Figura 4.25, de acordo com o preconizado pela norma EN 12697-6, procedimento B, segundo a expressão (4.9), acima indicada.



Figura 4.25 - Procedimento para o cálculo da baridade (DECA-UBI)

Posteriormente ao cálculo da baridade, determinou-se a porosidade dos provetes, segundo a expressão (4.10) e cujos resultados de ambas as propriedades se apresentam no Quadro 4.17, relativos aos valores médios para cada mistura betuminosa.

Quadro 4.17 - Resultados da baridade e da porosidade dos provetes prismáticos (média de 12 vigas)

Misturas betuminosas	% De betume	Baridade [kg/m ³]	Porosidade [%]
MQ	5,4	2260	7,2
MT	4,9	2240	8,4
MT30	4,4	2310	4,1

Analisando as duas propriedades apresentadas no quadro, verifica-se que os valores da baridade das vigas cumprem a baridade máxima teórica do Quadro 4.11, apresentando para a mistura

betuminosa a quente e para a mistura betuminosa com betume temperado valores ligeiramente baixos comparativamente com os obtidos para os provetes cilíndricos, já para a mistura betuminosa com betume temperado e incorporação de material fresado a baridade apresenta-se ligeiramente superior. Consequentemente, a porosidade exhibe valores acima dos obtidos para os provetes cilíndricos nas misturas que apresentam baridades mais baixas, mostrando a mistura betuminosa com betume temperado e incorporação de material fresado um valor coerente relativamente aos provetes cilíndricos.

O facto de se terem obtido valores de baridade baixos e, por conseguinte, valores de porosidade elevados deve-se às notórias diferenças de temperatura na compactação, uma vez que esta foi executada no exterior do laboratório em condições atmosféricas desfavoráveis levando ao arrefecimento mais rápido das misturas, para além da perda de temperatura no percurso desde o local de fabrico das misturas até ao local de compactação.

Como já foi referido, os provetes prismáticos foram submetidos ao ensaio de resistência à fadiga passados 28 dias da sua produção. O equipamento utilizado para o efeito foi o instalado nos laboratórios do departamento de Engenharia Civil da UBI, ilustrado na Figura 4.26.



Figura 4.26 - Colocação de provete prismático no equipamento (DECA-UBI)

Durante o tempo de cura os provetes permaneceram numa sala com controlo de temperatura, a 20 °C, sendo o ensaio efetuado com a mesma temperatura e com frequência de aplicação de cargas de 10 Hz.

Os ensaios foram realizados em extensão controlada, optando-se por valores de amplitude de extensão de 200 e 400 μm , por meio de um carregamento sinusoidal sem período de repouso. Para cada extensão foram ensaiados um mínimo de três provetes.

Conforme indicado na norma EN 12697-24, o módulo de rigidez inicial da mistura, medido ao fim de 100 ciclos de aplicação de carga, foi tomado como referência para determinar o momento da rotura dos provetes, correspondendo a uma redução de 50 % em relação ao valor inicial.

Tendo em vista a caracterização da resistência à fadiga das três misturas betuminosas em estudo, apresentam-se de seguida os resultados e a análise dos ensaios de flexão em quatro pontos realizados com os provetes prismáticos. Através dos resultados obtidos, é possível definir uma lei de fadiga para cada mistura betuminosa, de forma a compreender o seu comportamento e a fazer uma comparação entre as diferentes misturas.

As leis de fadiga que se obtêm, para determinadas condições de ensaio, resultam da relação entre a extensão imposta e o número de aplicação de carga, no ponto em que se atinge o critério de rotura. Estas leis são materializadas a partir de uma curva, obtida por regressão linear dos resultados dos provetes ensaiados, podendo ser expressa através da expressão (3.1) já apresentada.

A avaliação da resistência à fadiga engloba também a determinação de dois parâmetros importantes: ϵ_6 que é a extensão de tração necessária para provocar a rotura por fadiga ao fim de 10^6 ciclos e N_{100} que é a resistência à fadiga para uma extensão de tração de 100 μm .

O número de provetes ensaiados para cada tipo de mistura betuminosa foi diferente. Para a mistura betuminosa a quente foram ensaiados três provetes para a extensão de 200 μm e quatro provetes para a extensão de 400 μm . Para as outras duas misturas foram ensaiados, por cada nível de extensão, três e cinco provetes, respetivamente, para a mistura betuminosa com betume temperado e para a mistura betuminosa com betume temperado e incorporação de material fresado. A diferença entre o número de provetes ensaiados entre as misturas deve-se a situações de avaria do *software* e a interrupções dos ensaios devido à perceção de situações irregulares, tal como rotura de provetes.

Os resultados alcançados para a resistência à fadiga das misturas estudadas apresentam-se no Quadro 4.18 e na Figura 4.27.

Analisando os resultados, a mistura betuminosa a quente (de referência) apresenta uma resistência à fadiga superior às outras duas misturas, no entanto, estas aproximam-se muito do número de ciclos obtido para ambas as extensões consideradas. A mistura betuminosa com betume temperado, comparada com a mistura betuminosa a quente, revela um número de ciclos muito semelhante para a extensão de 200 μm , contudo, para a extensão de 400 μm esta mistura expõe valores abaixo do esperado. A mistura betuminosa com betume temperado e incorporação de material fresado apresenta um número de ciclos bastante próximo das outras duas misturas, assemelhando-se mais com a mistura betuminosa a quente para a extensão de 400 μm , revelando um melhor comportamento à fadiga que a mistura betuminosa apenas com betume temperado.

Quadro 4.18 - Resultados dos ensaios de resistência à fadiga

Misturas betuminosas	Extensão [μm]	Rigidez [MPa]	Vida à fadiga [ciclos]
MQ	200	4695	3 451 499
	200	6470	3 414 999
	200	5645	5 835 999
	400	4440	101 999
	400	5528	95 999
	400	5119	159 999
	400	4423	259 499
MT	200	5705	3 642 499
	200	6603	3 735 999
	200	4538	1 015 000
	400	4852	95 499
	400	4163	25 499
	400	3974	28 499
MT30	200	9915	2 816 499
	200	10233	1 736 999
	200	9662	1 370 499
	200	8067	1 484 999
	200	8974	2 584 499
	400	7724	160 499
	400	7857	127 000
	400	6760	178 500
	400	7702	121 999
	400	8164	63 500

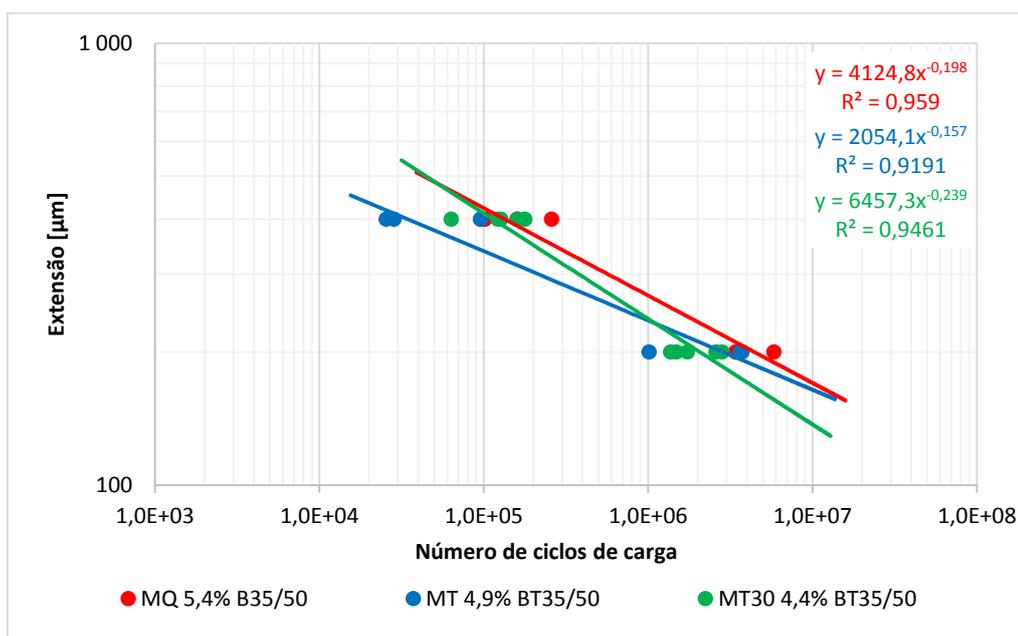


Figura 4.27 - Leis de fadiga de provetes prismáticos moldados em laboratório

Os valores de rigidez obtidos para a mistura betuminosa a quente e para a mistura betuminosa com betume temperado são bastante próximos entre si. A razão pela qual a mistura betuminosa com betume temperado e incorporação de material fresado apresenta valores de rigidez mais elevados deve-se ao facto de esta mistura conter 30 % de material fresado. Este material, por já ter sido exposto num pavimento, apresenta um betume envelhecido com uma menor penetração e, portanto, a rigidez da mistura incorporando este material é maior, uma vez que contém menor teor de betume novo.

No Quadro 4.19 apresentam-se os coeficientes relativos às leis de fadiga obtidos para as distintas misturas betuminosas estudadas.

Quadro 4.19 - Coeficientes obtidos para as leis de fadiga

Misturas betuminosas	a	b	R ²	N ₁₀₀	ε ₆
MQ	4124,8	-0,198	0,96	1,44E+08	268
MT	2054,1	-0,157	0,92	2,29E+08	235
MT30	6457,3	-0,239	0,95	3,74E+07	238

A resistência à fadiga para uma extensão de tração de 100 μm, segundo o Quadro 4.19, é maior para a mistura betuminosa com betume temperado, seguida da mistura betuminosa a quente, atingindo um número de ciclos acima dos 200 milhões e dos 100 milhões, respetivamente. A mistura betuminosa com betume temperado e incorporação de material fresado obteve o menor valor de N₁₀₀, considerado, no entanto, um valor satisfatório.

As leis de fadiga conseguidas permitiram obter coeficientes de correlação (R²) acima dos 92 % para as três misturas, observando-se que a mistura betuminosa a quente tem um coeficiente de correlação superior às outras duas misturas, tendo a mistura betuminosa com betume temperado e incorporação de material fresado um valor bastante aproximado.

A mistura betuminosa a quente revelou ter a maior extensão de tração necessária para provocar a rotura por fadiga ao fim de 1 milhão de ciclos (ε₆). As duas misturas betuminosas com betume temperado apresentam valores próximos entre si, não se distanciando muito da mistura de referência.

Comparativamente com os resultados obtidos pelas experiências em obra realizadas em Espanha, cujos resultados se apresentam no Quadro 2.2, as misturas em estudo mostram coeficientes de correlação superiores, tanto para a mistura betuminosa a quente como para a mistura betuminosa com betume temperado. Analisando os resultados para ε₆, observa-se que a mistura betuminosa a quente com betume 35/50 tem uma extensão superior (268 μm) que a mistura betuminosa a quente com betume 50/70 (113 μm), acontecendo o mesmo com as

misturas com betumes temperados (235 μm para a mistura com betume BT 35/50 e 134 μm para a mistura com betume BT 50/70). Nesta comparação de resultados é de salientar as diferenças nos betumes utilizados e no teor dos mesmos. Para além disso, os provetes deste trabalho foram executados em laboratório e os provetes em Espanha foram retirados de obra, sendo o método de compactação diferente. Outros aspetos, como as condições de ensaio são também preponderantes nos resultados obtidos. Tendo em conta estas distinções, seria de esperar, teoricamente, que as misturas betuminosas com betume 35/50 ou betume BT 35/50 obtivessem valores de ϵ_6 inferiores, pois este betume tem menor penetração que os betumes 50/70, resultando numa mistura com menor resistência à fadiga. Uma vez que, as misturas com betumes 35/50 revelaram, na prática, ter uma maior extensão de tração ao fim de 1 milhão de ciclos e, portanto, uma maior resistência à fadiga, considera-se ter obtido bons resultados neste estudo.

De forma conclusiva, as misturas betuminosas com betumes temperados apresentam um ótimo comportamento á fadiga, comparativamente com a mistura betuminosa a quente, tida como referência. Observa-se ainda que a incorporação de material fresado nestas misturas é uma mais-valia, uma vez que, para além de manter as características das misturas, também são economizados recursos naturais.

Capítulo 5 - Considerações finais

5.1 Principais conclusões

As misturas betuminosas temperadas têm especial interesse, não só na indústria viária, como a uma escala global, uma vez que apresentam um conjunto de vantagens a favor do meio ambiente que nos rodeia. A implementação destas misturas, como técnica de reciclagem, constitui uma das alternativas a considerar no projeto de reabilitação estrutural de pavimentos rodoviários flexíveis. Por isso, é necessário comprovar o desempenho equivalente deste tipo de misturas com as misturas betuminosas convencionais.

Era objetivo principal deste trabalho avaliar o comportamento mecânico, ao nível da resistência à fadiga, de misturas betuminosas com betumes temperados, ou seja, misturas betuminosas produzidas a temperaturas mais baixas. Para além disso, o objetivo também consistia em avaliar misturas betuminosas temperadas com incorporação de material fresado, de forma a economizar recursos naturais, que cada vez são mais escassos. Para tal, pretendia-se comparar estas misturas com uma mistura betuminosa a quente (com aplicação em camadas de desgaste), que ainda hoje ocupa um lugar preferencial no ramo da construção rodoviária.

Para a produção das misturas betuminosas, em laboratório, foi efetuada uma caracterização prévia dos materiais utilizados. O material fresado antes da extração do betume envelhecido verifica o cumprimento do fuso granulométrico, sendo um fator importante na obtenção de uma mistura betuminosa reciclada adequada. Realizou-se, posteriormente, um estudo de composição respeitante aos agregados naturais e ao material fresado, através da análise granulométrica, assim como à quantidade de teor dos ligantes betuminosos em cada mistura. Deste estudo resultou, a percentagem de cada agregado a incluir nas misturas e a escolha do teor ótimo de betume. A determinação do teor de betume teve em conta as propriedades fundamentais, baridade e porosidade, e os resultados do ensaio Marshall, estabilidade e deformação, tendo estas características que cumprir os requisitos preconizados no Caderno de Encargos das Estradas de Portugal e no *Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes* (PG-3, especificação espanhola). Estes requisitos são os especificados para misturas betuminosas a quente, análogas às misturas betuminosas temperadas, pois ainda não existem condições definidas para estas. Deste estudo resultaram os teores de 5,4 % de betume 35/50 para a mistura betuminosa a quente, 4,9 % de betume BT 35/50 para a mistura betuminosa com betume temperado e 4,4 % de betume BT 35/50 para a mistura betuminosa com betume temperado e incorporação de 30 % de material fresado. Por último, realizaram-se os ensaios de caracterização mecânica das misturas, por meio do ensaio de tração indireta em compressão diametral, ensaio de sensibilidade à água e ensaio de resistência à fadiga.

Os resultados do ensaio de tração indireta em compressão diametral revelam um módulo de rigidez superior para a mistura betuminosa a quente, seguida da mistura betuminosa com betume temperado e incorporação de material fresado. A razão pela qual a mistura betuminosa com betume temperado e agregados naturais obteve um módulo de rigidez inferior ao da mistura com material fresado é o facto de esta última conter um material, que devido ao tempo já exposto num pavimento apresenta um betume envelhecido com uma menor penetração. Assim, este betume envelhecido vai influenciar, significativamente, na diminuição da penetração do ligante final e, desta forma, a rigidez da mistura com material fresado é maior, pois contém menor teor de betume novo. Esta observação serve também para justificar os resultados de rigidez obtidos no ensaio de resistência à fadiga.

No ensaio de sensibilidade à água, a resistência à tração indireta (ITS) para os provetes “a seco”, em média, é equivalente à dos provetes imersos resultando numa resistência conservada em tração indireta (ITSR) igual a 97 %, para a mistura betuminosa a quente e para a mistura betuminosa com betume temperado. A mistura betuminosa temperada com material fresado apresenta um valor de ITSR de 100 %, revelando que esta mistura não permite a penetração de água nos provetes de ensaio, impossibilitando a sua danificação. Uma vez que, o Caderno de Encargos das Estradas de Portugal, S.A. não referencia qualquer requisito para o ensaio de sensibilidade à água recorreu-se mais uma vez ao PG-3 que refere um valor superior a 85 % para as misturas a quente em camadas de desgaste, verificando-se o cumprimento deste valor nas misturas em estudo. Através do ensaio de sensibilidade à água foi possível classificar os tipos de rotura encontrados nos provetes cilíndricos, observando-se entre as misturas betuminosas “roturas de tração clara” e “deformação”, segundo a norma vigente.

Na produção dos provetes prismáticos para ensaio de resistência à fadiga foram misturados, aproximadamente, 85 kg de cada tipo de mistura, resultando num total de 36 vigas. As propriedades fundamentais das misturas betuminosas, obtidas para estes provetes revelaram resultados importantes neste trabalho. O cálculo da baridade assume valores que cumprem a baridade máxima teórica, no entanto, leva a que a porosidade das misturas betuminosas a quente e com betume temperado seja excessiva comparativamente com a porosidade obtida nos provetes cilíndricos. A justificação para esta observação deve-se às notórias diferenças de temperatura na compactação, uma vez que esta foi efetuada no exterior do laboratório, em condições atmosféricas desfavoráveis, conduzindo ao seu arrefecimento mais rápido.

Os provetes prismáticos foram ensaiados através do ensaio de flexão em quatro pontos com extensões de tração de 200 e 400 μm , sendo utilizado como critério de rotura a redução de 50 % do valor inicial do módulo de rigidez. A mistura betuminosa a quente (de referência) foi a que obteve melhor resistência à fadiga, apresentando um número de ciclos, para as duas extensões, superior que as outras duas misturas. Contudo, a mistura betuminosa com betume temperado obteve um número de ciclos equivalente para a extensão de 200 μm , assim como a

mistura com material fresado para a extensão de 400 μm . A avaliação da resistência à fadiga para uma extensão de 100 μm (N_{100}) revelou-se maior para a mistura betuminosa com betume temperado, acima dos 200 milhões, seguida da mistura betuminosa a quente, acima dos 100 milhões, e por último a mistura betuminosa com betume temperado e incorporação de material fresado que obteve o menor valor, cerca de 37 milhões, considerado satisfatório.

Os coeficientes de correlação (R^2), conseguidos pelas leis de fadiga, situam-se acima dos 92 % para todas as misturas sendo superiores aos obtidos nos estudos realizados em obra pela CEPESA, em Espanha. Na avaliação da extensão de tração necessária para provocar a rotura por fadiga ao fim de 1 milhão de ciclos (ϵ_6) verificou-se que a mistura betuminosa a quente com betume 35/50 conseguiu o maior valor de 268 μm relativamente à mesma mistura do estudo da CEPESA mas com betume 50/70 com o valor de 113 μm , tal como a mistura betuminosa com betume BT 35/50 com 235 μm e a mistura com betume BT 50/70 com 134 μm . Tendo em conta as diferenças mencionadas no capítulo 4, entre o presente estudo e o estudo da CEPESA, salientam-se os betumes utilizados. Sendo assim, teoricamente, as misturas com betumes 35/50 ou BT 35/50 deveriam ter valores de ϵ_6 inferiores aos das misturas com betumes 50/70 ou BT 50/70, pois estes têm maior penetração, originando misturas com maior resistência à fadiga. Revelando as misturas estudadas, um maior valor de ϵ_6 , conclui-se que as misturas com betumes de menor penetração também têm um bom desempenho à fadiga.

Tendo em conta os objetivos desta dissertação, verifica-se que foram cumpridos, ou seja, as misturas betuminosas com betumes temperados apresentam um ótimo comportamento à fadiga, comparativamente com a mistura betuminosa a quente, sendo uma alternativa viável. Conclui-se que a temperatura de compactação das misturas betuminosas temperadas é um fator preponderante para garantir um bom desempenho em serviço das mesmas, sendo necessário ter um cuidado acrescido na fase de produção e aplicação. Confirma-se ainda, que a incorporação de material fresado nestas misturas é uma mais-valia, uma vez que, para além de manter as características das misturas convencionais, também são economizados recursos naturais.

As misturas betuminosas com betumes temperados, com ou sem incorporação de material fresado, reúnem um conjunto de vantagens que conjugadas com o bom desempenho à fadiga, integram uma das técnicas com maior potencial de crescimento nos próximos anos, possibilitando a modernização da rede rodoviária tendo em conta preocupações ambientais, sociais e económicas.

5.2 Trabalhos futuros

Em desenvolvimento deste trabalho, deveria ser prosseguido o estudo laboratorial do comportamento à fadiga de misturas betuminosas temperadas, com e sem material fresado, através de observações de troços experimentais, averiguando a comprovação do bom

desempenho das misturas em laboratório. A obtenção de correlações entre os resultados obtidos em laboratório e os resultados observados *in situ*, ajudariam na compreensão do fenómeno de fadiga nos pavimentos flexíveis com as referidas misturas e, possivelmente, permitiriam estabelecer especificações que conduziriam ao dimensionamento dos pavimentos, ajustando-se mais à realidade. Teria especial interesse realizar a monitorização do comportamento das misturas betuminosas, consideradas neste estudo, quando aplicadas nos troços experimentais, no que concerne à sua resistência à fadiga ao longo do tempo.

Seria pertinente a realização de estudos de avaliação da resistência à fadiga para misturas betuminosas com outros betumes, com outros tipos de agregados, com diferentes percentagens de material fresado, incluindo taxas de reciclagem elevadas.

Outros aspetos que não foram tidos em conta na realização deste trabalho com misturas betuminosas temperadas, com e sem material fresado, mas que são considerados fundamentais na avaliação da resistência à fadiga e que poderão vir a ser trabalhados são os processos de envelhecimento do betume constituinte da mistura, que naturalmente conduzem a uma redução do tempo de vida das misturas betuminosas, e o efeito do tempo de repouso entre carregamentos sucessivos no comportamento das misturas à fadiga.

Quanto ao ensaio de avaliação da resistência à fadiga propriamente dito, é proposta, em alternativa, a realização do ensaio de tração indireta ou compressão diametral. Propõe-se também a realização do ensaio de flexão em quatro pontos, mas interpretando os resultados dos ensaios de fadiga através da adoção de uma metodologia baseada no conceito de energia dissipada.

O conjunto dos trabalhos acima mencionados pretende persuadir futuros investigadores a estudar estes fenómenos devido à realidade portuguesa, no que diz respeito à aplicação de misturas betuminosas temperadas em pavimentos, contribuindo para a normalização de procedimentos adaptados à tecnologia em Portugal.

Referências Bibliográficas

AAPA (2001). Warm Mix Asphalt - A state-of-the-art review. Advisory note 17, Australian Asphalt Pavement Association, Kew, Victoria, Australian, june.

Abreu, L; Oliveira, J.R.M.; Silva, H.M.R.D. (2013). Formulação e Caracterização de Ligantes numa Mistura Betuminosa com uma Taxa de Reciclagem Elevada. VII Congresso Rodoviário Português - Novos desafios para a atividade rodoviária, Lisboa, Portugal, 10 - 12 de abril.

AEMA (1981). Recommended Performance Guidelines. Asphalt Emulsion Manufacturers Association, Washington, D.C.

Alconada, I. (2011). Contribuição para o Estudo do Comportamento Mecânico de Mistura Betuminosas Mornas. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, Portugal, setembro.

Al-Rawashdeh, A. (2008). Performance Assessment of Warm Mix Asphalt (WMA) Pavements. MSc Thesis, Russ College of Engineering and Technology of Ohio University, Athens, United States, november.

Antunes, M. (2005). Modelação do Comportamento de Pavimentos Rodoviários Flexíveis. Programa de Investigação, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal.

Antunes, M. e Batista, F. (2009). Reciclagem de Pavimentos Utilizando Ligantes Betuminosos. 2^{as} Jornadas CEPESA Betumes/CRP, Poupança: Energia e recursos naturais, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal, 7/8 de julho.

Baptista, A. (2006). Misturas Betuminosas Recicladas e Quente em Central - Contribuição para o seu Estudo e Aplicação. Tese de Doutoramento, Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal, dezembro.

Baptista, A. e Picado-Santos, L. (2006). Desempenho de Misturas Betuminosas Recicladas a Quente. IV Congresso Rodoviário Português, Lisboa, Portugal, abril.

Barbosa, F. (2012). Contribuição para o Estudo do Desempenho de Misturas Betuminosas Temperadas. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, Portugal, outubro.

Barrão, L. (2011). Avaliação do Comportamento de Misturas Betuminosas sob Temperaturas Elevadas. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia 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. Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia de Universidade do Porto, Porto, Portugal, novembro.

Batista, F.; Antunes, M.L.; Fonseca, P. (2008). Avaliação da Sensibilidade à Água de Misturas Betuminosas com Betumes Modificados com Alta Percentagem de Borracha. V Congresso Rodoviário Português - Sistemas Inteligentes, Logística e Turismo, Estoril, Portugal, 12 - 14 de março.

Bispo, F. (2013). Avaliação do Desempenho de Misturas Betuminosas Recicladas Temperadas com Emulsão Betuminosa. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade da Beira Interior, Covilhã, Portugal, junho.

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

Capitão, S. D.; Picado-Santos, L. G.; Martinho, F. (2012). Pavement Engineering Materials: Review on the use of warm-mix asphalt. Construction and Building Materials, Vol. 36, november, pp. 1016-1024. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.06.038>

Cardoso, A. (2012). Estudo em Laboratório com Comportamento Mecânico de Misturas Betuminosas Utilizadas em Pistas Experimentais. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, julho.

Carvalho, T. e Barreno, I. P. (2013). Ligantes Betuminosos Temperados. VII Congresso Rodoviário Português - Novos desafios para a atividade rodoviária, Lisboa, Portugal, 10 - 12 de abril.

CEPSA (2010a). Betumes de Baixa Temperatura. Catálogo. Disponível em: http://www.cepsa.com/cepsaPt/O_Que_Oferecemos/Produtos_Asfalticos/Produtos/Estrada/Betumes/ [Consulta 17 março 2014].

CEPSA (2010b). Manual de Pavimentação. CEPSA Betumes, 2ª Edição, Lisboa, Portugal.

Chowdhury, A. and Button, J.W. (2008). A Review of Warm Mix Asphalt. Texas Transportation Institute, Report No. 473700-00080-1, Texas, United States, december.

D'Angelo, J.; Harm, E.; Bartoszek, J.; Baumgardner, G.; Corrigan, M.; Cowser, J.; Harman, T.; Jamshidi, M.; Jones, W.; Newcomb, D.; Prowell, B.; Sines, R.; Yeaton, B. (2008). Warm-mix Asphalt: Europe Practice. Federal Highway Administration, U.S. DoT, AASHTO, NCHRP, Report no. FHWA PL-08-007, Alexandria.

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

Dinis-Almeida, M. (2010). Caracterização e Formulação de Misturas Betuminosas Recicladas Temperadas em Central. Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade da Beira Interior, Covilhã, Portugal, dezembro.

Dinis-Almeida, M.; Castro Gomes, J.; Antunes, M. L. (2012a). Mechanical Performance and Economic Evaluation of Warm Mix Recycling. SIV - 5th International Congress - Sustainability of Road Infrastructures, Rome, Italy, Procedia - Social and Behavioral Sciences, Vol. 53, 3 october, pp. 286-296. <http://dx.doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.09.881>

Dinis-Almeida, M.; Castro Gomes, J.; Antunes, M.L. (2012b). Mix Design Considerations from Warm Mix Recycled Asphalt with Bitumen Emulsion. Construction and Building Materials, Vol. 28, Issue 1, march, pp. 687-693. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.10.053>

EAPA (2002). Performance-Related Specification System for Bituminous Binders for Paving. European Asphalt Pavement Association, Brussels, Belgium, 29 may.

EAPA (2005). Low Temperature Asphalt. European Asphalt Pavement Association, Brussels, Belgium, june.

EAPA (2008). Arguments to Stimulate the Government to Promote Asphalt Reuse and Recycling. European Asphalt Pavement Association, Brussels, Belgium, 21 may.

EAPA and NAPA (2009). The Asphalt Paving Industry - A Global Perspective. European Asphalt Pavement Association and National Asphalt Pavement Association, august.

EAPA (2010). The use of Warm Mix Asphalt. European Asphalt Pavement Association, Brussels, Belgium, january.

EAPA (2013). Asphalt in Figures 2012. European Asphalt Pavement Association, Brussels, Belgium, november.

Estradas de Portugal, S.A. (2012). Caderno de Encargos Tipo Obra, Capítulo 14.03 - Pavimentação, Características dos materiais. Estradas de Portugal, S.A., Vol. 3, janeiro.

Ferreira, C. (2009). Avaliação do Desempenho de Misturas Betuminosas Temperadas. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia da Universidade do Minho, Guimarães, Portugal, dezembro.

Fonseca, P. (2002). A Reciclagem de Pavimentos Rodoviários. 6ª Semana das Engenharias, Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Bragança, Bragança, Portugal, abril.

Fonseca, P.; Guimarães, C.; Gomes, V.; Palha, D.; Silva, H.M.R.D.; Oliveira, J.R.M.; Abreu, L. (2008). Estudo de Material Fresado para Incorporação em Misturas Betuminosas a Quente com Altas Taxas de Reciclagem. VII Congresso Rodoviário Português - Novos desafios para a atividade rodoviária, Lisboa, Portugal, 10 - 12 de abril.

Jenkins, K. (2000). Mix Design Considerations for Cold and Half-Warm Bituminous Mixes with Emphasis on Foamed Bitumen. PhD Thesis, Stellenbosch: University of Stellenbosch, South Africa.

FHWA (1979). A Basic Asphalt Emulsion Manual. Manual Series No. 19, Second Edition, FHWA-IP-79-1, The Asphalt Institute, Maryland, United States.

Koenders, B.G.; Stoker, D.A.; Robertus, C.; Larsen, O.; Johansen, J. (2002). Wam-Foam - Asphalt Production at Lower Operating Temperatures. 9th International Conference on Asphalt Pavements, Vol. 1 of 2, august, pp. 161-169, Copenhagen, Denmark.

Kristjánsdóttir, O.; Muench, S.T.; Michael, L.; Burke, G. (2007). Assessing the Potential for Warm-Mix Asphalt Technology Adoption. Journal Transportation Research Board of the National Academies, Vol. 2040, february, pp. 91-99. <http://dx.doi.org/10.3141/2040-10>

Leandri, P.; Cuciniello, G.; Losa, M. (2012). Study of Sustainable High Performance Bituminous Mixtures. SIIV - 5th International Congress - Sustainability of Road Infrastructures, Rome, Italy, Procedia - Social and Behavioral Sciences, Vol. 53, 3 october, pp. 495-503. <http://dx.doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.09.900>

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

Maccarone, S.; Holleran, G.; Ky, A. (1995). Cold Asphalt Systems as an Alternative to Hot Mix. Proceedings, 9th AAPA International Asphalt Conference, Australia.

Mendes, S. (2011). Caracterização Mecânica de Misturas Betuminosas a Aplicar em Infra-Estruturas de Transportes. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, Portugal, novembro.

Minhoto, M. (2005). Consideração da Temperatura no Comportamento à Reflexão de Fendas dos Reforços de Pavimentos Rodoviários Flexíveis. Tese de Doutoramento, Escola de Engenharia da Universidade do Minho, Guimarães, Portugal, agosto.

Miranda, H. (2008). Resistência à Fadiga de Misturas Betuminosas com Betume Modificado com Alta Percentagem de Borracha. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, Portugal, janeiro.

Miranda, H.; Neves, J.; Batista, F.; Antunes, M.L.; Fonseca, P. (2008). Desempenho de Misturas Betuminosas com Borracha: Estudo da Resistência à Fadiga Segundo a Norma EN 12697-24. V Congresso Rodoviário Português - Sistemas Inteligentes, Logística e Turismo, Estoril, Portugal, 12 - 14 de março.

Moreira, J. e Pereira, P. (2007). Reutilização de Material Fresado em Camadas Estruturais de Pavimento - Novas Perspetivas. VI Jornadas Luso-Brasileiras de Pavimentos - Inovação e Novos Desafios. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 15/16 de novembro.

Neves, J.M.C. e Correia, A.G. (2006). Caracterização da Rigidez de Misturas Betuminosas em Ensaios de Tracção Indirecta por Compressão Diametral de Provetes Cilíndricos. Revista Engenharia Civil UM, Universidade do Minho, Braga, Portugal, Número 26, maio, pp. 61-74.

Neves, J.; Picado-Santos, L.; Alves, M. C.; Martinho, F.; Barbosa, F. (2013). Estudo Experimental sobre o Desempenho de Misturas Betuminosas Temperadas. VII Congresso Rodoviário Português - Novos desafios para a atividade rodoviária, Lisboa, Portugal, 10 - 12 de abril.

Nynas (2009). Asfalto Templado, Semi-Templado y Frio: El Caso a Favor de la Sostenibilidad. Revista Performance - Nynas Bitumen Magazine, Edición 01, España, otoño, pp. 8-9.

Nynas (2011). Examen de la Fissuration de Fatigue dans les Enrobés. Revista Performance - Nynas Bitumen Magazine, Numéro 1, España, printemps, pp. 14-15.

Nunes, H.; Lucas, F.; Páez, A. (2008). Betumes Inovadores: Betumes Modificados com Polimeros de Alta Viscosidade, Betumes de Baixa Temperatura de Aplicação, Ligantes Sintéticos - Recofal. V Congresso Rodoviário Português - Sistemas Inteligentes, Logística e Turismo, Estoril, Portugal, 12 - 14 de março.

Hurley, G. and Prowell, B. (2006). Evaluation of Potential Processes for Use in Warm Mix Asphalt. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 75, pp. 41-85.

Otto, G. (2009). Misturas Asfálticas Mornas - Verificação da Fadiga e do Módulo Complexo. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil.

Pais, A.R. (2013). Misturas Betuminosas Recicladas Temperadas - Validação de uma nova metodologia de formulação. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade da Beira Interior, Covilhã, Portugal, junho.

Pais, J. e Pereira, P. (2000). Avaliação da Resistência à Fadiga das Misturas Betuminosas. I Congresso Rodoviário Português - A Qualidade Rodoviária na Viragem do Século, Lisboa, Portugal, 28 - 30 de novembro.

Pais, J.; Pereira, P.; Azevedo, M. (2000). Ensaio Mecânicos para Caracterização das Misturas Betuminosas. I Congresso Rodoviário Português - A Qualidade Rodoviária na Viragem do Século, Lisboa, Portugal, 28 - 30 de novembro.

Palha, C.; Silva, H.; Oliveira, J. (2009) Comparação de Diferentes Métodos de Ensaio Normalizados para Avaliação do Módulo de Rigidez e Resistência à Fadiga das Misturas Betuminosas. XV Congresso Ibero-LatinoAmericano do Asfalto, Lisboa, Portugal, 22 - 27 de novembro.

Park, K.; Hwang, Y.; Seo, S; Seo H. (2003). Quantitative Assessment of Environmental Impacts on Life Cycle of Highways. Journal of Construction Engineering and Management, American Society of Civil Engineers, 129(1), 25-31.

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

Pereira, P. e Miranda, V. (1999). Gestão da Conservação dos Pavimentos Rodoviários. Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, Braga, Portugal.

Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3) (OC 29/2011). Artículo 542 - Mezclas betuminosas en caliente tipo hormigón betuminoso. Ministerio de Fomento, Dirección General de Carreteras, España.

Prowell, B.D. and Hurley, G.C. (2008). Warm-Mix Asphalt: Best Practices. National Asphalt Pavement Association. Quality Improvement Series 125.

Prowell, B.; Hurley, G.; Frank, B. (2008). Warm-Mix Asphalt: Best Practices. National Asphalt Pavement Association, Quality Improvement Publication 125, Second Edition.

Reyes-Ortiz, O.; Berardinelli, E.; Alvarez, A. E.; Carvajal-Muñoz, J. S.; Fuentes, L. G. (2012). Evaluation of Hot Mix Asphalt Mixtures with Replacement of Aggregates by Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) Material. SIIV - 5th International Congress - Sustainability of Road Infrastructures, Rome, Italy, Procedia - Social and Behavioral Sciences, Vol. 53, 3 october, pp. 370-388. <http://dx.doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.09.889>

Santos, J.M.R. (2010). Materiais Utilizados na Construção de Pavimentos Rodoviários. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal.

Sengoz, B. and Oylumluoglu, J. (2013). Utilization of Recycled Asphalt Concrete with Different Warm Mix Asphalt Additives Prepared with Different Penetration Grades Bitumen. Construction and Building Materials, Vol.45, august, pp. 173-183. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.097>

Silva, H.M.R.D.; Oliveira, J.R.M.; Jesus, C.M.G. (2012). Are Totally Recycled Hot Mix Asphalts a Sustainable Alternative for Road Paving? Resources, Conservation and Recycling, Vol. 60, march, pp. 38-48. <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.11.013>

Teixeira, A. (2000). Caracterização da Resistência à Fadiga de Misturas Betuminosas em Equipamento Servopneumático. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 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.

Acervo Normativo

EN 12591:2009	Bitumen and bituminous binders - Specifications for paving grade bitumens.
EN 12697-1:2000	Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 1: Soluble binder content.
EN 12697-5:2002	Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 5: Determination of the maximum density.
EN 12697-6:2003	Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 6: Determination of bulk density of bituminous specimens.
EN 12697-8:2003	Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 8: Determination of void characteristics of bituminous specimens.
EN 12697-12:2003	Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 12: Determination of the water sensitivity of bituminous specimens.
EN 12697-24:2004	Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 24: Resistance to fatigue.
EN 12697-23:2003	Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 23: Determination of the indirect tensile strength of bituminous specimens.
EN 12697-26:2004	Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 26: Stiffness.
EN 12697-30:2004	Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 30: Specimen preparation by impact compactor.
EN 12697-33:2003	Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 33: Specimen prepared by roller compactor.

EN 12697-34:2004	Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 34: Marshall test.
EN 12697-39:2004	Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 39: Binder content by ignition.
EN 13108-20:2006	Bituminous mixtures - Material specifications - Part 20: Type Testing.
NP EN 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 13108-8:2011	Misturas betuminosas - Especificações dos materiais - Parte 8: Misturas betuminosas recuperadas.