



INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO
Universidade Técnica de Lisboa

CONTRIBUIÇÃO PARA O ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MISTURAS BETUMINOSAS MORNAS

Ignacio Barbosa Alconada

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil

Júri

Presidente: Prof. José Álvaro Pereira Antunes Ferreira

Orientador: Prof. Luis Guilherme de Picado Santos

Vogal: Prof. José Manuel Coelho das Neves

Setembro 2011

AGRADECIMENTOS

Quero agradecer a concretização desta tese a toda a gente que me apoiou e esteve comigo na realização da mesma.

No que respeita ao âmbito académico, tenho de agradecer imensamente ao meu orientador, Professor Doutor Luís de Picado Santos, pela sua atenção e dedicação para me preparar tudo, incluindo a deslocação a Coimbra para fabricação das amostras.

O acolhimento que me deram no Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra também é motivo para eu agradecer, nas pessoas do Técnico de Laboratório Celestino Marques, Filipe Lopes e a Eng^a Arminda Almeida.

Ao pessoal do Departamento de Vias de Comunicação e Transportes do Instituto Superior Técnico de Lisboa, o Eng. João Crucho, pela sua amizade e ajuda com o início dos ensaios, e o Técnico de Laboratório Rui Garcia, pela sua colaboração aquando de alguns problemas que surgiram.

Aos meus amigos de sempre, pelo seu apoio incondicional, e aos novos amigos que encontrei nesta minha experiência como estudante em Portugal.

À minha família, em especial aos meus pais, María de los Ángeles Alconada Hernández e Joaquín Adelino Barbosa Miranda, pela sua força na distância através do telefone. Sem eles teria sido impossível continuar nos piores momentos.

RESUMO

O objectivo desta dissertação é estudar o comportamento de deformabilidade e a fadiga de vigas fabricadas com misturas betuminosas mornas para camada de base, cuja temperatura de fabrico não ultrapassa 120 °C, e comparar os resultados com aquilo que ocorre normalmente para misturas betuminosas tradicionais a quente, com temperaturas de fabrico habitualmente superiores a 150 °C, para uso no mesmo tipo de camada.

O fabrico dos provetes prismáticos foi realizado no Laboratório de Mecânica de Pavimentos (LPAV) do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra (DEC-FCTUC), sendo as misturas preparadas usando uma cera orgânica e segundo a orientação de uma tese de doutoramento em curso.

O ensaio destes provetes foi realizado no Laboratório de Vias de Comunicação e Transportes (LVCT) do Instituto Superior Técnico (IST), usando um equipamento de flexão em quatro pontos.

Os resultados mostram que, para a composição adoptada, tendo nomeadamente um baixo teor em betume, as misturas apresentam uma boa resistência à deformabilidade e um baixo desempenho em termos de resistência à fadiga.

Como desenvolvimento futuro considera-se indispensável experimentar outras composições porque se pode verificar que o potencial deste tipo de misturas é assinalável.

PALAVRAS-CHAVE

Pavimentos rodoviários

Misturas betuminosas

Ceras orgânicas

Ensaio de flexão

Fadiga

Deformabilidade

ABSTRACT

The objective of this dissertation is to study the deformation and fatigue behavior of beams made with warm bituminous mixtures, for which fabrication temperature doesn't raise above 120 °C, for base course and compare the results with that normally occur in traditional bituminous mixtures of the same type but for which the fabrication temperature is 150°C or above.

The manufacture of the prismatic specimens was performed at the Pavement Mechanics Laboratory (LPAV) of the Department of Civil Engineering of University of Coimbra (DEC-FCTUC). The mixtures were prepared using an organic wax and according to the specifications of a on-going doctoral thesis.

The testing of these samples was performed at the Transport and Infrastructures Laboratory (LVCT) of the Instituto Superior Técnico (IST), by four point bending beam equipment.

The results demonstrate that for the adopted composition, particularly presenting a low content of bitumen, the mixtures have a good resistance to deformability and a low performance in terms of fatigue resistance.

As a future development it is essential to consider trying out other compositions because it was understood with this study that the potential of such mixtures is notable.

KEYWORDS

Road pavements
Bituminous mixtures
Organic waxes
Bending tests
Fatigue
Deformability

ÍNDICE

1. Introdução	1
1.1. Enquadramento	1
1.1.1. Objectivos	1
1.1.2. Metodologia	2
1.1.3. Estrutura	2
2. Misturas betuminosas mornas	4
2.1. Introdução	4
2.2. Descrição das estruturas de pavimento	4
2.3. Descrição dos diversos tipos de misturas betuminosas	9
2.4. Características de misturas mornas e temperadas usadas em outras situações	13
3. Descrição dos trabalhos efectuados	19
3.1. Enquadramento	19
3.1.1. Equipamento do ensaio de flexão em quatro pontos	19
3.1.2. Ensaio de flexão em quatro pontos	21
3.2. Fabrico e caracterização orgânica dos provetes	23
3.2.1. Restrições geométricas	25
3.2.2. Caracterização geométrica	25
3.2.3. Caracterização física	27
3.3. Caracterização da deformabilidade	28
3.3.1. Determinação da temperatura	29

Índice

3.3.2. Determinação da frequência	29
3.3.3. Modo de carregamento	30
3.4. Caracterização da fadiga	35
3.5. Comparação com misturas tradicionais	42
4. Conclusão e trabalhos futuros	46
4.1. Conclusões gerais	46
4.2. Trabalhos futuros	46
4.3. Conclusões finais	47
Bibliografia	48

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Esquema de pavimento rodoviário (INIR)	5
Figura 2.2 - Esquematisação do pavimento flexível, da sua forma de funcionamento e da sua forma de degradação (Cepsa, 2010)	6
Figura 2.3 - Esquematisação do pavimento semi-rígido, da sua forma de funcionamento e da sua forma de degradação (Cepsa, 2010)	7
Figura 2.4 - Esquematisação do pavimento rígido, da sua forma de funcionamento e da sua forma de degradação (Cepsa, 2010)	8
Figura 2.5 - Classificação das tecnologias de produção de misturas betuminosas em função da temperatura de fabrico (Silva et al, 2010)	9
Figura 2.6 - Resultados dos ensaios com adição de Sasobit (a) e de Cecabase (b) (Silva et al, 2009)	15
Figura 2.7 - Módulo de deformabilidade das misturas retiradas do trecho experimental (Silva et al, 2009)	16
Figura 3.1 - Unidade de flexão (Cooper, 2011)	20
Figura 3.2 - Unidade de flexão no interior da câmara climática	20
Figura 3.3 - Unidade de controlo (Crucho, 2011)	21
Figura 3.4 - Reservatório de ar comprimido (Crucho, 2011)	21
Figura 3.5 - Unidade de aquisição de dados (Crucho, 2011)	21
Figura 3.6 - Computador e software	21
Figura 3.7 - Esquema do ensaio de flexão em quatro pontos (EN 12697-24, 2004)	22
Figura 3.8 - Tabuleiros com agregados na estufa a 120°C	23
Figura 3.9 - Balança usada no fabrico e fibras de Sasobit	23
Figura 3.10 - Tabuleiros com mistura na estufa a 120°C	23

Figura 3.11 - Espalhamento da mistura no molde	23
Figura 3.12 - Mistura espalhada no molde antes do início da compactação	24
Figura 3.13 - Laje rasante com o molde depois de feita a compactação	24
Figura 3.14 - Máquina usada para corte das lajes	24
Figura 3.15 - Lajes cortadas em provetes	24
Figura 3.16 - Detalhe da abertura máxima nos dispositivos de fixação	25
Figura 3.17 - Corte dos provetes para rebaixamento da sua altura	25
Figura 3.18 - Modos de carregamento disponíveis no software dos ensaios (Baptista, 2006)	30
Figura 3.19 - Módulo de deformabilidade a 20°C	31
Figura 3.20 - Módulo de deformabilidade a 30°C	32
Figura 3.21 - Módulo de deformabilidade a 40°C	32
Figura 3.22 - Módulo de deformabilidade a 1 Hz	34
Figura 3.23 - Módulo de deformabilidade a 5Hz	35
Figura 3.24 - Módulo de deformabilidade a 10 Hz	35
Figura 3.25 - Ensaio de fadiga do provete 1.3	38
Figura 3.26 - Ensaio de fadiga do provete 2.10	39
Figura 3.27 - Ensaio de fadiga do provete 3.13	39
Figura 3.28 - Representação da lei de fadiga e das leis da Shell e da JAE	42
Figura 3.29 - Representação das leis de fadiga das misturas em comparação	45

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 - Resultados dos ensaios realizados em laboratório com mistura convencional (Silva et al, 2009)	13
Quadro 2.2 - Resultados dos ensaios realizados em laboratório com as três misturas em estudo (Silva et al, 2009)	15
Quadro 2.3 - Resultados dos ensaios realizados nos carotes retirados do trecho experimental (Silva et al, 2009)	16
Quadro 2.4 – Composição granulométrica das misturas ensaiadas (Pérez e Pérez, 2009)	17
Quadro 2.5 – Composição granulométrica das misturas ensaiadas (Pérez e Pérez, 2009)	17
Quadro 3.1 – Características da mistura	19
Quadro 3.2 – Composição granulométrica da mistura	19
Quadro 3.3 – Características geométricas dos provetes	26
Quadro 3.4 – Características físicas dos provetes	28
Quadro 3.5 – Resultados do ensaio de módulo de deformabilidade a 20°C	33
Quadro 3.6 – Resultados do ensaio de módulo de deformabilidade a 30°C	33
Quadro 3.7 – Resultados do ensaio de módulo de deformabilidade a 40°C	34
Quadro 3.8 – Resultados do ensaio de fadiga	37
Quadro 3.9 – Resultados do módulo de deformabilidade a 10 Hz e 20°C	38
Quadro 3.10 – Resultados complementares da resistência à fadiga	42
Quadro 3.11 – Características das misturas de referência (Baptista, 2006 e Picado-Santos et al, 2010)	43
Quadro 3.12 – Resultados do módulo de deformabilidade (10 Hz) da mistura em estudo e das misturas de comparação	43

Quadro 3.13 – Resultados do módulo de deformabilidade da mistura em estudo calculado pelo método da Shell	44
Quadro 3.14 – Parâmetros representativos da lei de fadiga para as misturas em comparação	44

SIMBOLOGIA

Alfabeto Latino

a - Constante, parâmetro característico dos materiais.

A_0 - Estimativa do nível de carregamento, Q.

A_1 - Estimativa da inclinação da linha de fadiga.

b - Constante, parâmetro característico dos materiais.

B - Largura do provete de ensaio.

c - Constante, parâmetro característico dos materiais.

E_m - Módulo de deformabilidade da mistura betuminosa.

H - Altura do provete de ensaio.

i - Número do provete.

j - Critério de rotura escolhido.

k - Conjunto das condições de ensaio.

L - Comprimento total do provete de ensaio.

M_{im} - Massa imerso do provete de ensaio.

M_{seca} - Massa seca do provete de ensaio.

M_{sm} - Massa superfície molhada do provete de ensaio.

N - Número de aplicações de carga.

N_{adm} - Número admissível de passagens do eixo padrão.

N_{80} - Número de eixos-padrão de 80 kN.

pb_{novo} - Percentagem de betume novo.

Simbologia

pb_{final} - Percentagem de betume final.

T_{ab} - temperatura de amolecimento pelo método de anel e bola.

V - Volume do provete de ensaio.

V_b - percentagem volumétrica de betume.

V_v - Percentagem volumétrica de vazios.

Alfabeto Grego

ε - Extensão.

ε_i - Amplitude inicial da extensão medida no centésimo ciclo de carga.

ε_t - Extensão radial (horizontal) de tracção em camadas estabilizadas com ligantes.

ε^6 - Extensão imposta para se obter um milhão de ciclos de carregamento.

δ – Baridade máxima teórica do provete de ensaio.

γ – Baridade ou peso específico aparente do provete de ensaio.

γ_{agua} – Peso específico da água à temperatura do teste.

Funções Matemáticas

$\log(x)$ - Logaritmo decimal de x.

$\ln(x)$ - Logaritmo neperiano de x.

ABREVIATURAS

AGEC - Agregado de Granulometria Extensa tratado com Cimento.

AR - Agentes Rejuvenescedores

CRT - Cooper Research Technology (Tecnologia de Investigação Cooper)

FCTUC - Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

GEE - Gases com Efeito de Estufa

INIR - Instituto de Infra-Estruturas Rodoviárias

ISEC - Instituto Superior de Engenharia de Coimbra

IST - Instituto Superior Técnico

ITSR - Indirect Traction Strength Ratio (Cociente de resistência à tracção por compressão diametral)

JAЕ - Junta Autónoma de Estradas

LEA - Low Energy Asphalt (Betão betuminoso de baixa energia)

LPAV - Laboratório de Mecânica de Pavimentos

LVCT - Laboratório de Vias de Comunicação e Transportes

MACOPAV - Manual de Concepção de Pavimentos

MBQ - Mistura Betuminosa à Quente

MBT - Misturas Betuminosas Temperadas

NP - Norma Portuguesa

TR - Taxa de reciclagem

WTS - Wheel Tracking Slope (Inclinação do resultado do "Wheel Tracking")

1. Introdução

1.1. Enquadramento

Nos últimos tempos trata-se de sensibilizar a população com certos problemas do meio ambiente, como são as alterações climáticas que de facto estão a ocorrer e que fazem antever um futuro não muito desejável.

As principais causas deste tipo de problemas são os gases com efeito de estufa (GEE), um dos quais é o dióxido de carbono (CO_2), produzido sempre que tem lugar uma combustão. Por exemplo, nos queimadores dos tambores secadores dos agregados, nos quais queimam-se grandes quantidades de combustível.

Para além disto, está também o problema do consumo de energia. O combustível usado nestes queimadores é um tipo de energia não renovável, o seu consumo deve ser o mínimo possível para poder ser aproveitado também em outras aplicações.

Desde a publicação do Protocolo de Kyoto em Fevereiro do ano 2005, que se pretende regular as emissões de GEE para a atmosfera, tem sido habitual o desenvolvimento de novos tipos de misturas betuminosas (Pérez e Pérez, 2010).

O parâmetro mais importante que se tem que regular no fabrico de misturas para pavimentos é a temperatura. Veja-se que quanto mais alta for, os queimadores vão ter que fornecer um gradiente também maior e portanto o consumo de combustível vai ser mais alto. Quanto maior for este consumo as emissões de gases para a atmosfera vão ser também maiores. Por isto, as novas misturas em estudo procuram a redução das temperaturas, tanto de fabrico como a usada na compactação.

Com este trabalho pretende-se avaliar o desempenho de misturas mornas, para camada de base, cuja temperatura de fabrico não ultrapassa $120\text{ }^\circ\text{C}$, de forma a perceber qual sua aplicabilidade em pavimentação rodoviária. Pretende ainda saber-se até que ponto vai ser possível no futuro estas misturas substituírem as misturas tradicionais, fabricadas ($> 150\text{ }^\circ\text{C}$) a quente.

1.1.1. Objectivos

Esta tese tem como objectivos principais os seguintes:

- 1) Caracterizar a deformabilidade de uma mistura betuminosa morna para camada de base.

- 2) Caracterizar a fadiga da mesma mistura.
- 3) Comparar os resultados obtidos com o comportamento normal de uma mistura betuminosa tradicional do mesmo tipo.

Este estudo é enquadrado por uma tese de doutoramento que pretende fazer o estudo deste tipo de misturas recorrendo a vários tipos de aditivos para baixar a temperatura de fabrico e compactação, e recorrendo ainda à incorporação de vários tipos de resíduos.

Pode dizer-se que este estudo agora apresentado é uma contribuição para o trabalho mais complexo que está a ser desenvolvido, pelo que o tipo de mistura aqui estudada corresponde a uma necessidade de caracterização das especificidades usadas, suportada pelo plano da tese de doutoramento em causa.

1.1.2. Metodologia

Para a concretização dos objectivos prevê-se o desenvolvimento de várias tarefas:

- 1) Na primeira parte dos trabalhos, serão misturadas as quantidades necessárias (agregados, betume e uma cera orgânica do tipo Sasobit) para fabrico das lajetas de mistura betuminosa morna no Laboratório de Mecânica de Pavimentos (LPAV) da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra (FCTUC). A compactação das lajetas com cilindro de rolos vibradores será efectuada nas instalações do Instituto Superior de Engenharia de Coimbra (ISEC). Após ficar 24 horas no molde, as lajes serão retiradas e cortadas em vigas.
- 2) Na segunda parte dos trabalhos, as vigas serão ensaiadas à deformabilidade e à fadiga no Laboratório de Vias de Comunicação e Transportes (LVCT) do Instituto Superior Técnico (IST).
- 3) Depois do tratamento dos resultados far-se-á a comparação com resultados de outros trabalhos para misturas a quente tradicionais, no sentido de poder inferir da possibilidade de uso das misturas mornas estudadas na tecnologia portuguesa.

1.1.3. Estrutura

A tese está dividida numa série de capítulos, cada um dos quais trata do que é descrito a seguir:

- ✓ Capítulo 1, *Introdução*: referem-se aqui de maneira superficial os aspectos gerais da dissertação, faz-se o enquadramento do tema que trata, citam-se os objectivos que se procuram e explica-se a metodologia para chegar aos mesmos.

- ✓ Capítulo 2, *Caracterização de misturas betuminosas mornas*: descreve-se aqui a teoria que está por detrás do tipo de misturas estudadas nesta tese, não só com o tipo de aditivo usado mas também no que respeita às restantes possibilidades que existem.
- ✓ Capítulo 3, *Descrição dos trabalhos efectuados*: neste capítulo detalham-se todos os passos executados no decorrer da tese. É aqui também que se faz o tratamento dos resultados obtidos, assim como as inferências que se podem obter por comparação com as misturas a quente semelhantes.
- ✓ Capítulo 4, *Conclusões e trabalhos futuros*: descreve-se neste capítulo as principais conclusões obtidas após a comparação entre misturas, relembram-se os objectivos principais enumerados ao início, comenta-se se foram atingidos e é proposto o que se poderia fazer no futuro para melhorar as conclusões ou melhor atingir os objectivos, assim como o trabalho necessário para poder evoluir neste campo.

2. Misturas betuminosas mornas

2.1. Introdução

As misturas betuminosas mornas (admitindo que são todas as misturas que não são fabricadas nem a quente nem a frio) são um tipo de misturas fabricadas e colocadas em obra a temperatura mais baixa que as misturas quentes tradicionais e podem utilizar-se em camadas de pavimentos rodoviários exercendo a função das misturas a quente.

No essencial a temperatura mais baixa de fabrico (abaixo de 120°C em lugar de acima de 140°C para as misturas a quente) é conseguida usando um aditivo, orgânico ou inorgânico, o qual faz baixar a viscosidade do betume para ser possível o fabrico a mais baixa temperatura, não afectando a resistência mecânica da mistura depois de colocada em obra (pelo menos de acordo com os fornecedores destes aditivos).

Neste capítulo vai descrever-se as estruturas de pavimento onde estas misturas podem ser usadas, caracterizar a diferença entre os diversos tipos de misturas betuminosas que podem ser usadas e ainda fazer a descrição de algumas experiências encontradas em trabalhos publicados, no sentido de fazer a caracterização mínima que permita um bom entendimento do que é o material que se pretende avaliar.

2.2. Descrição das estruturas de pavimento

Quando é projectada e aprovada a construção de uma via de comunicação (estrada, caminho de ferro, aeroporto), é preciso ela ter certas propriedades para garantir uma série de condições:

- Confortabilidade para os utentes.
- Segurança para os utentes.
- Económicas para o promotor.
- Ambientais para a sociedade.

O pavimento tem um papel de primordial importância no assegurar daquelas condições. Para estradas (Figura 2.1) trata-se de uma estrutura em forma de camadas onde cada uma delas desempenha uma função.

A camada principal da fundação do pavimento é o leito do pavimento (Figura 2.1), camada de coroamento da terraplenagem, em geral constituída por materiais mais nobres e que se destina a conferir suficiente resistência mecânica à fundação para a construção da camada de sub-base sem que ocorram deformações excessivas, tendo também um papel importante na resistência global do pavimento.

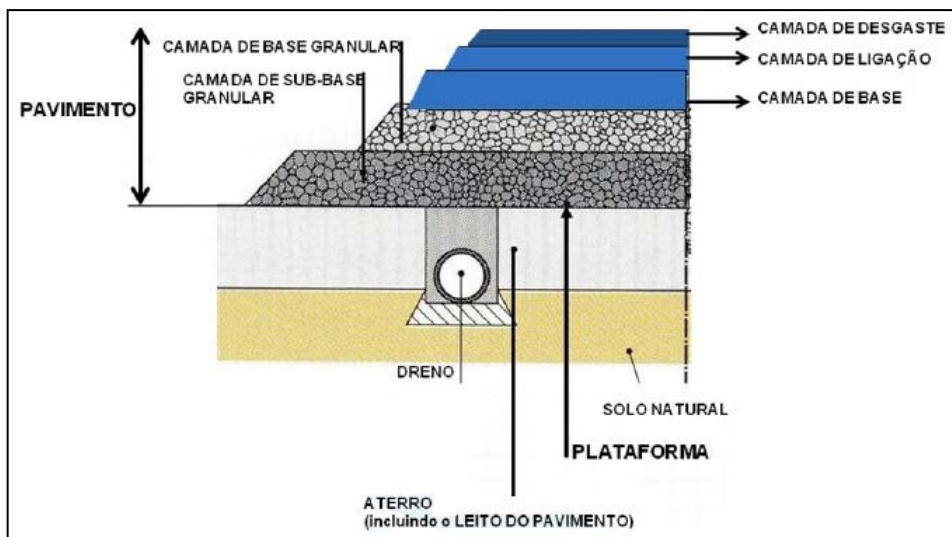


Figura 2.1 - Esquema de pavimento rodoviário (INIR, 2011)

Todas as camadas de pavimento são camadas estruturais, umas mais que outras, cuja função é dotar ao pavimento de resistência mecânica e permiti-lhe suportar as cargas verticais causadas pelo tráfego.

A sub-base, embora tenha alguma função de dissipação das cargas, serve no essencial para proteger a fundação dos esforços causados durante o tempo de construção e para não deixar subir a água filtrada através da mesma.

A base granular e/ou ligada (onde se inclui a camada de ligação) tem como objectivo dissipar no máximo possível as cargas que vêm da superfície para as camadas inferiores não serem sujeitas a esforços muito grandes.

O desgaste é a camada mais superficial, que recebe os esforços directamente do tráfego e tem que distribuí-los adequadamente. Precisa de ter também uma boa drenabilidade superior, contribuindo assim para o conforto e visibilidade na circulação.

O conjunto de funções de todas elas deve permitir atingir as correctas condições de funcionamento já enumeradas.

As duas propriedades mecânicas mais importantes que a estrutura deve possuir são: a resistência (para suportar as acções do tráfego e dos agentes atmosféricos) e a rigidez (boa resposta sem excessivas deformações quando da aplicação das cargas).

De acordo com isto, a estrutura em forma de camadas pode variar um pouco em função do tipo de pavimento que se tiver.

Em Portugal, mais do 90% dos pavimentos são do tipo flexível, em que as camadas superiores são compostas de misturas betuminosas e as restantes por materiais granulares britados. É por isto que, na maior parte dos estudos que estão a decorrer na actualidade, faz-se caracterização de materiais com certas variações na sua composição mas sempre focados no desenvolvimento dos pavimentos flexíveis.

Nos pavimentos flexíveis, são as camadas betuminosas as que em maior medida devem suportar as cargas do tráfego e transmiti-las muito degradadas para as restantes camadas e para a fundação, de forma a ela suportar as solicitações recebidas (Figura 2.2).

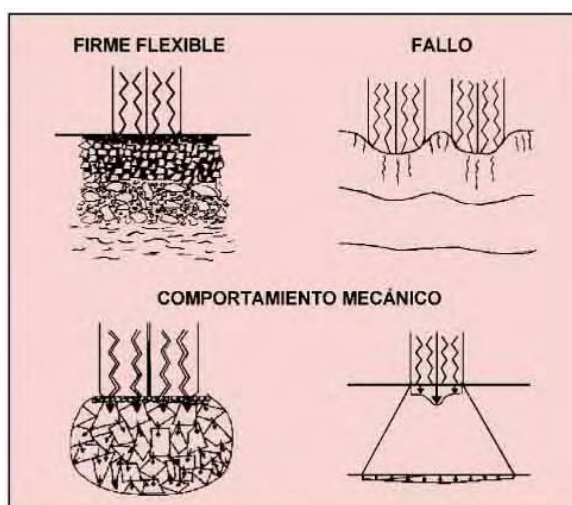


Figura 2.2 - Esquemática do pavimento flexível, da sua forma de funcionamento e da sua forma de degradação (Cepsa, 2010)

A degradação deste tipo de pavimentos (Figura 2.2) ocorre essencialmente por fadiga nas camadas betuminosas (traduzindo-se por fendilhamento à superfície ou na base das camadas ligadas) e por deformação permanente (traduzindo-se por assentamento significativo à superfície, designado por rodeiras) com contribuição de toda a estrutura de pavimento.

Também é usual ocorrerem falhas na superfície (desprendimento de agregados ou deformações localizadas), que vão piorar as condições para a circulação dos utentes. As causas principais são o tráfego e os agentes atmosféricos, mas também uma má execução dos trabalhos de construção.

No caso dos pavimentos semi-rígidos (Figura 2.3), as camadas superiores são compostas de misturas betuminosas (geralmente só a camada de desgaste, mas também pode ser a de regularização). As camadas inferiores a essas são de materiais granulares tratados com ligantes hidráulicos.

Estes pavimentos caracterizam-se porque a camada de base é mais rígida do que nos pavimentos flexíveis. Portanto, é esta camada quem absorve a maior parte das cargas verticais do tráfego, para chegarem ao leito do pavimento muito frágeis.

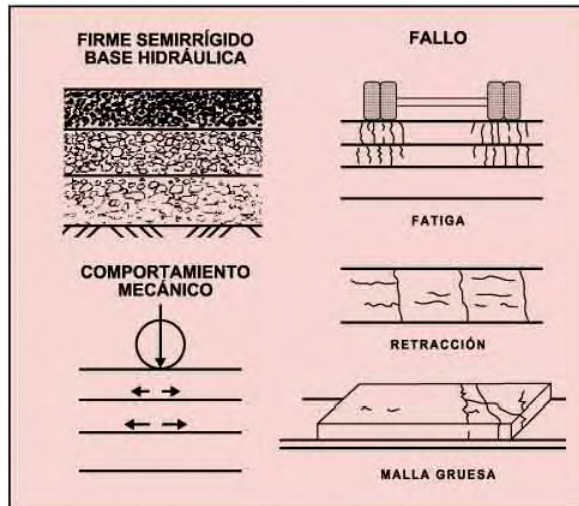


Figura 2.3 - Esquemática do pavimento semi-rígido, da sua forma de funcionamento e da sua forma de degradação (Cepsa, 2010)

A deterioração neste tipo de pavimentos é produzida pelos ditos esforços de flexo-tracção na base, que acabam por causar fendilhamento por fadiga. Aparecem fendas que evoluem para produzir a falha do pavimento.

Pode ocorrer, quando o material da camada de base não é de boa qualidade ou não foi correctamente executado, que não adquira coesão e fique a comportar-se como material granular solto. Assim, aumentam as tensões e aparecem novamente fendas.

Estes dois problemas tinham lugar na camada de base. Também pode acontecer a perda de adesão entre dita camada e as camadas betuminosas, devido a três possíveis causas:

- Pouca espessura das camadas betuminosas.
- Má execução do pavimento.
- Uso de pavimentos permeáveis que deixam à água entrar até a zona de contacto com a camada de base.

Na superfície, é muito usual neste tipo de pavimentos a aparição de fendas transversais no pavimento, devido à retracção na camada de base que é propagada para cima.

No caso dos pavimentos rígidos (Figura 2.4), a camada de desgaste é composta de betão de cimento de elevada resistência, com ou sem armadura. Não há camada de base, a laje de betão já faz as funções de desgaste e base.

Pode ser colocada directamente sobre a fundação ou ser fabricada uma camada suporte de betão de cimento menos resistente, em betão pobre por exemplo, que não tem uma função estrutural decisiva (essencialmente só oferece apoio à laje principal).

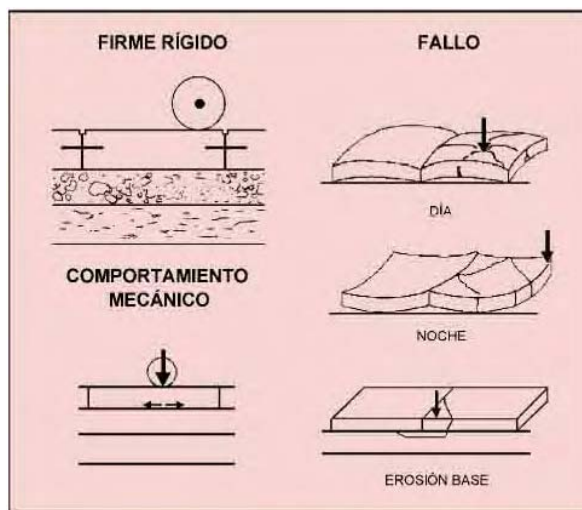


Figura 2.4 - Esquemática do pavimento rígido, da sua forma de funcionamento e da sua forma de degradação (Cepsa, 2010)

Também pode introduzir-se uma camada de mistura betuminosa entre a laje de betão e a camada de suporte, que minimize o efeito na fronteira entre a laje estrutural e a base (por exemplo em betão pobre) da contracção-dilatação que ocorre em ambas mas com diferentes respostas, o que poderia originar o acumular tensões localizadas que poderiam dar origem a roturas localizadas em ambas as camadas.

A falha mais usual neste tipo de pavimentos (Figura 2.4) é de tipo superficial na laje (fendilhamento por fadiga), mas podem aparecer também falhas nas juntas (desprendimento do produto de selagem) ou na posição relativa entre lajes (desalinhamento das mesmas).

Estes problemas produzem uma redução na qualidade do rolamento e portanto reduzem a comodidade e segurança nos utentes.

A deterioração pode ser diminuída se for realizada uma laje armada e contínua, sem juntas. Neste caso, o fendilhamento (se aparecer) vai ser por causa essencialmente ligada a uma má execução.

Para finalizar com o que tem a ver com os pavimentos, de acordo com o reflectido no MACOPAV, se em algum caso é tomada a decisão de colocar três camadas betuminosas, nas duas inferiores deve-se colocar um macadame betuminoso que é uma mistura em que a granulometria contínua dos agregados é mais grossa (a dimensão máxima é maior) do que no caso de misturas betuminosas para camada de desgaste e de ligação.

2.3. Descrição dos diversos tipos de misturas betuminosas

Pode fazer-se uma classificação dos tipos de misturas atendendo ao grau de redução da temperatura de fabrico e colocação em obra e à forma como são conseguidas essas reduções.

Só para usar a mesma plataforma de denominação atente-se na Figura 2.5. Pode aqui verificar-se que as misturas mornas que se vão caracterizar são englobadas na designação de semi-temperadas, já que as designadas misturas temperadas têm uma temperatura de fabrico entre 120°C e 140°C.

No caso deste estudo interessam as misturas "semi-temperadas" com temperaturas de fabrico entre 100°C e 120°C, pelo que vai continuar-se a chamar-se mornas a essas misturas para as diferenciar das outras misturas semi-temperadas, com temperatura de fabrico entre 60°C e 100°C.

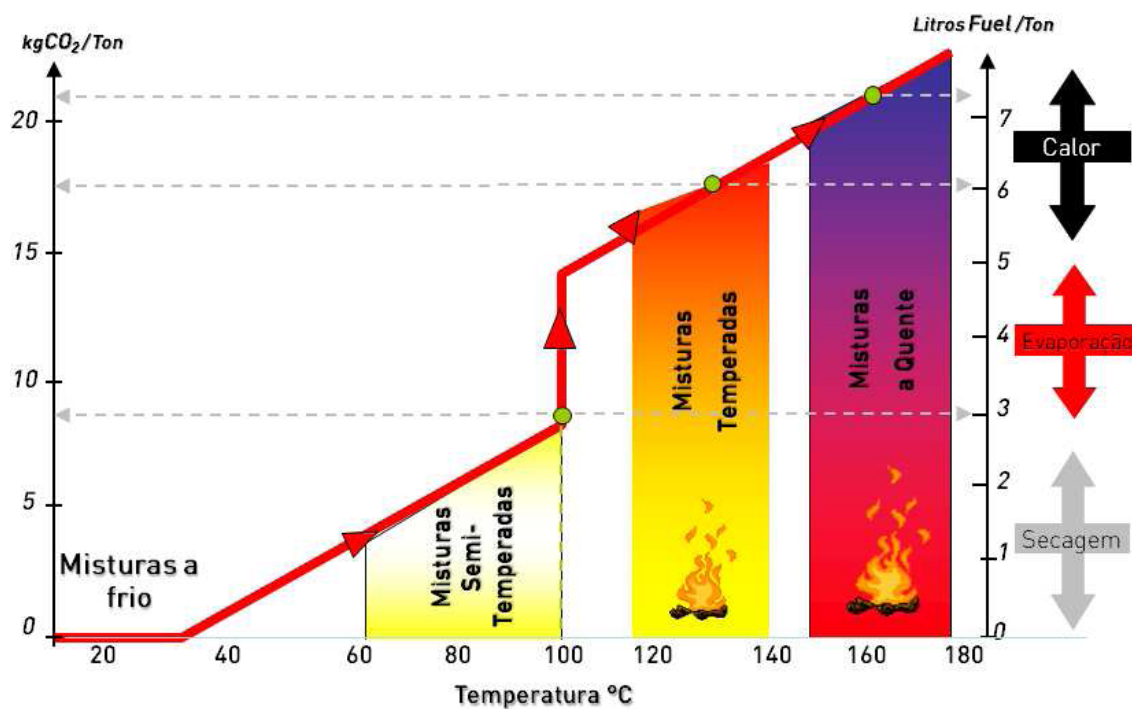


Figura 2.5 - Classificação das tecnologias de produção de misturas betuminosas em função da temperatura de fabrico (Silva et al, 2010)

A situação fica assim:

- A quente para $140^{\circ}\text{C} < T < 180^{\circ}\text{C}$.

Neste tipo de misturas, a temperatura de fabrico e colocação em obra é a necessária, não sendo realizado nenhum tipo de redução na mesma. Pertencem a este tipo as misturas

tradicionais, nas quais o gasto de energia e as emissões de gases à atmosfera não são controladas.

Os aditivos que normalmente são usados nestas misturas não cumprem a função de diminuir as temperaturas de fabrico e colocação em obra, tratando-se essencialmente de alterar alguma das propriedades da mistura.

Um exemplo disto é o caso da reciclagem de pavimentos, onde são acrescentados os chamados agentes rejuvenescedores (AR) ao material recuperado que o pavimento tinha anteriormente para recompor o ligante. Os AR são betumes de baixa consistência, contêm agentes aromáticos que devolvem ao betume as suas características reológicas originais, ductilidade e consistência (Betunel, 2010).

- Mornas para $100^{\circ}\text{C} < T < 120^{\circ}\text{C}$.

Neste tipo de misturas é introduzido um agente (aditivo) que faz descer a temperatura à qual podem ser fabricadas e colocadas em obra até o intervalo acima dito. O aditivo usado pode ser um dos seguintes:

- 1) Zeólitas: são silicatos cuja estrutura apresenta muito espaço entre as moléculas constituintes (materiais porosos). Nestes espaços é também retida a água quimicamente associada ao betume (especialmente aplicável quando são usadas emulsões betuminosas). Quando são aquecidas a temperaturas baixas (comparadas com as temperaturas das misturas tradicionais), esta água junto com a própria água que a zeólita contém evapora-se, o betume aumenta de volume e facilita-se a mistura para as ditas temperaturas. O aquecimento é produzido quando entra em contacto o betume com os agregados quentes da zeólita, dando basicamente origem a um betume-espuma (menos viscoso a temperaturas mais baixas).
- 2) Ceras: são compostos orgânicos dos chamados lípidos. Estes, da sua parte, estão constituídos por um grupo variado de elementos com diferentes características (as ceras, concretamente, são de tipo éster). Por sua vez, as ceras podem ser classificadas em vários grupos, sendo que as mais usadas no âmbito das misturas mornas são as parafínicas. As ceras parafínicas são uma mistura de hidrocarbonetos saturados (ligações simples entre carbonos) de cadeia linear. À temperatura ambiente têm consistência sólida. Deste tipo são as usadas neste trabalho. O nome comercial pelo que são conhecidas é Sasobit®.
- 3) Agentes tensioactivos: aditivos que quando são adicionados no processo de mistura fazem que a tensão de superfície dos líquidos seja reduzida. Este efeito facilita a mistura porque reduz a viscosidade do betume. O nome comercial do agente mais usado no fabrico de misturas mornas é Cecabase®.

- Semi-temperadas para $60^{\circ}\text{C} < T < 100^{\circ}\text{C}$.

A principal característica deste tipo de misturas é o seu fabrico e colocação a temperatura inferior a 100°C . O menor consumo de energia vem do facto dos agregados grossos não serem totalmente secos. Numa mistura a quente, é nesta fase onde mais energia é consumida.

A humidade que fica nos agregados grossos é aproveitada para melhorar o processo de mistura. A água vai aumentar de volume aquando o aquecimento da mistura e vai facilitar o envolvimento dos agregados pelo betume.

Atendendo aos tipos que há, as misturas semi-temperadas podem ser fabricadas com betume ou com emulsão betuminosa. Para melhorar o processo também podem ser adicionados aditivos.

Os aditivos usados neste caso são compostos de misturas de ceras parafínicas sintéticas, resinas de hidrocarbonetos, polímeros termoplásticos e inibidores da oxidação químicos. A viscosidade do betume é modificada, permitindo baixar mais a temperatura do que nas misturas mornas (Soto et al, 2009).

Existem também novos sistemas de fabrico para estas misturas, ficando a temperatura por baixo dos 100°C . Um dos mais conhecidos é o usado no chamado "betume de baixa energia" (LEA® - Low Energy Asphalt em terminologia anglo-saxónica). O seu padrão de funcionamento é a formação de espuma no betume e pode ser obtido seguindo vários processos:

- ✓ A secagem só afecta os agregados grossos e areia, que são misturados com todo o betume. A seguir são adicionados os agregados finos sem aquecer, sendo que a humidade que contém gera uma espuma que facilita a mistura por volta dos 100°C .
- ✓ São secados só os agregados grossos. A seguir são adicionadas as areias e o betume, formando-se a espuma por um processo semelhante ao anterior.
- ✓ É introduzido todo o agregado (grosso e fino) mas não totalmente seco. A seguir é adicionado o betume formando-se a espuma.

O aspecto final que apresenta a mistura é muito semelhante com o aspecto da mistura tradicional a quente e podem ser fabricadas nas mesmas centrais de produção, só é preciso garantir a existência de equipamentos para dosagem da água, gestão da humidade e controle do aquecimento do ligante. Os betumes usados também são do mesmo tipo que para as misturas tradicionais.

A última coisa que é preciso fazer a mais nas misturas semi-temperadas é uma maior compactação, por causa da água residual que possa ficar.

- A frio (T: temperatura ambiente).

Este tipo de misturas só pode ser obtida se é usado como ligante uma emulsão betuminosa (Cepssa, 2010).

Uma emulsão betuminosa é uma dispersão de betume em água. A água contém partículas pequenas de betume (traças).

A dispersão do betume na água é conseguida através de emulsionantes. Estes possuem duas partes bem diferenciadas: uma parte com grande afinidade pelo betume (hidrofóbica) e outra parte com grande afinidade pela água (hidrofílica). Desta forma, os emulsionantes formam uma película em torno das partículas dispersas de betume, conseguindo a dispersão deste na água.

O que fazem é conhecido pelo nome de evitar a “rotura da emulsão”, quer dizer que evitam a união das partículas de betume que ocorre naturalmente quando são juntas sem o emulsionante.

Há outros dois parâmetros que têm grande influência no processo da rotura, são as percentagens de finos e de fíler da mistura. Atendendo a isto pode-se classificar as emulsões em três tipos:

- ✓ De rotura lenta. Adequadas para envolver misturas com altas percentagens de finos (bases tratadas com emulsão, microaglomerados e misturas recicladas a frio in situ).
- ✓ De rotura média. Adequadas para envolver misturas com baixas percentagens de finos (misturas abertas, nas quais o ligante é tratado com aditivos fluidificantes).
- ✓ De rotura rápida. Proporcionam uma elevada coesão inicial (revestimentos superficiais).

Doutro lado, as emulsões betuminosas podem ser de dois tipos, consoante o tipo de emulsionante:

- ✓ Aniónicas. A parte hidrofóbica do emulsionante está carregada negativamente. O mais usado é o estearato sódico, que ioniza-se em água e dá um anião solúvel em betume. À volta de cada partícula de betume é formada uma película de iões de estearato carregados negativamente, o que faz afastar as partículas e evita a sua coagulação.

- ✓ Catiónicas. Proporcionam carga positiva às partículas de betume. As mais usadas são sais quaternários de amónio, dão um catião carregado positivamente que situa-se à volta das partículas de betume e adere aos agregados carregados negativamente.

Em geral, é possível para as emulsões catiónicas ter uma boa adesividade com qualquer tipo de agregado (desde que o emulsionante seja o adequado) mas as aniónicas são geralmente adequadas só para agregados básicos (Cepsa, 2010).

Todos estes tipos de emulsões podem ser fabricadas a partir de betumes convencionais ou de betumes modificados, dando origem a diferentes tipos de emulsões com diferentes características.

2.4. Características de misturas mornas e temperadas usadas em outras situações

As situações que se vão descrever nesta secção foram tiradas de uma série de artigos consultados para o desenvolvimento desta dissertação.

Segundo Silva et al (2009), foi comparada uma mistura convencional com dois tipos de misturas temperadas (morna num caso), uma delas com aditivo Sasobit e a outra com aditivo Cecabase. Para os três casos foi usada uma mistura AC 14 Surf 50/70 (NP EN 13108-1).

Os parâmetros de composição (tipo de agregados, curva granulométrica, tipo e percentagem de ligante) mantiveram-se constantes nas três misturas, só tendo sido modificadas a percentagem de aditivo e as temperaturas de fabrico e compactação.

A percentagem óptima de ligante foi de 5%, já que todos os parâmetros Marshall estavam dentro das especificações. Tendo sido executado o estudo adicional previsto na NP EN 13108-1 com anexo nacional português, chegaram aos resultados que podem ser vistos no Quadro 2.1.

Quadro 2.1 - Resultados dos ensaios realizados em laboratório com mistura convencional (Silva et al, 2009)

Percentagem de betume (%)	4,5	5	5,5
Resistência à deformação permanente, WTS air (mm/10 ³)	0,06	0,08	0,09
Sensibilidade à água, ITR (%)	39,9	47	41,9
Volume de vazios, Vv (%)	4,4	3,5	2,7

Analisando os resultados que obtiveram, pode dizer-se que os valores da resistência à deformação permanente são bons em qualquer dos casos. Naturalmente a uma maior percentagem em betume corresponderam maiores deformações do provete mas todos os valores permitiriam escolher a percentagem de betume.

No que respeita à sensibilidade à água, obtiveram resistências conservadas em tracção indirecta (ITSR) relativamente baixas, apenas atingindo 47% no caso da percentagem de betume óptima que apresenta o melhor comportamento neste aspecto.

No final dos resultados obtidos, os valores do volume de vazios também são os esperados. A uma maior percentagem em betume corresponderam menores volumes de vazios nos provetes. Pode dizer-se que a percentagem de 5% foi bem escolhida.

O conteúdo óptimo de aditivo das misturas betuminosas temperadas baseou-se na caracterização (penetração, ponto de amolecimento e viscosidade dinâmica) de várias amostras de betume convencional modificado com 2, 3 e 4% de Sasobit e 0,2, 0,3 e 0,4% de Cecabase.

Concluíram que a adição de Sasobit reduzia a viscosidade dinâmica do ligante. Fixando o valor da viscosidade limite que a norma permite, observou-se que a temperatura descia mais com maior percentagem de Sasobit, e por isso foi escolhida a quantidade de 4% de aditivo Sasobit. No caso do aditivo Cecabase, a análise foi inconcludente e decidiram escolher a quantidade de 0,3% que o produtor aconselhou.

A selecção das temperaturas de produção baseou-se no ensaio de compactabilidade pelo método do impacto previsto na metodologia Marshall (EN 12697-10), comparando a porosidade a diversas temperaturas com a porosidade obtida na mistura betuminosa a quente. Obtiveram os resultados representados na Figura 2.6.

Verificaram que com Sasobit puderam reduzir a temperatura de fabrico até os 140°C sem comprometer os limites volumétricos estabelecidos. No caso das misturas com Cecabase, concluiu-se que é possível reduzir a temperatura de fabrico até os 120°C sem variar significativamente a porosidade.

Com as condições anteriormente definidas, fizeram um estudo no laboratório para avaliar o desempenho tendo encontrado os resultados que se mostram no Quadro 2.2.

Como se pode ver, as características das MBT são análogas às da MBQ, verificando-se que as condições de fabrico foram correctamente seleccionadas.

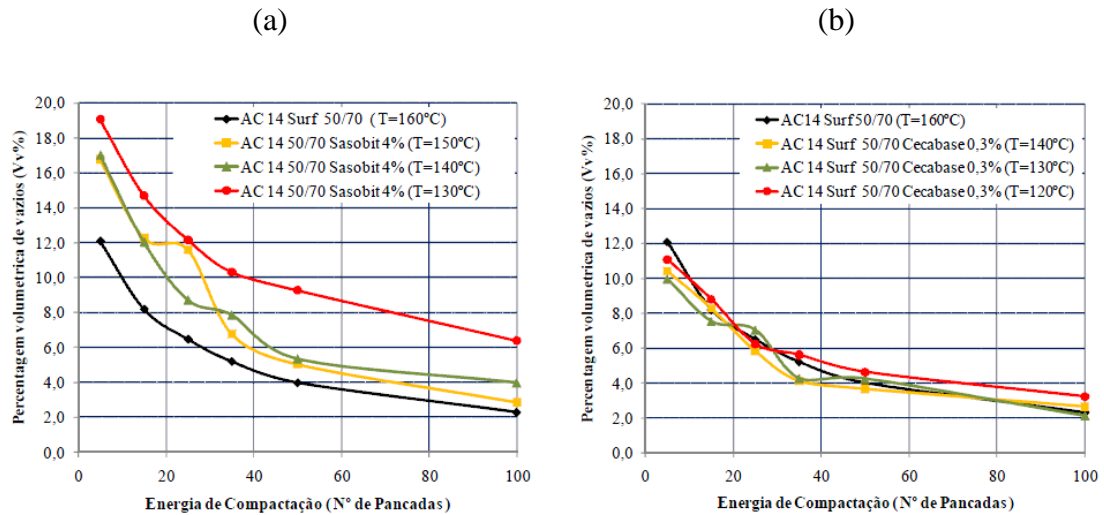


Figura 2.6 - Resultados dos ensaios com adição de Sasobit (a) e de Cecabase (b) (Silva et al, 2009)

Quadro 2.2 - Resultados dos ensaios realizados em laboratório com as três misturas em estudo (Silva et al, 2009)

Tipo de mistura	Norma	MBQ	MBT Sasobit	MBT Cecabase
Percentagem de betume (%)	EN 12697-1	5	5	5
Baridade máx. teórica (kg/m ³)	EN 12697-5	2.420	2.409	2.401
Volume de vazios, Vv (%)	EN 12697-8	3	3,5	3
Sensibilidade à água, ITSR (%)	EN 12697-12	47	42	52
Resistência à deformação permanente, WTS air (mm/10 ³)	EN 12697-22	0,08	0,1	0,11

No final deste artigo realizaram um trecho experimental com as mesmas misturas estudadas no laboratório. Extrairam uma série de carotes que foram ensaiados para assim caracterizar o desempenho das misturas. Obtiveram as características volumétricas, a sensibilidade à água e a resistência a deformação permanente (Quadro 2.3), assim como o módulo de deformabilidade das mesmas (Figura 2.7).

Analisaram os resultados e observaram que a percentagem de betume é similar para as três misturas em estudo. O desempenho em obra resulta ser muito melhor, como indica o valor

muito maior do ITSR, o que pode estar relacionado com os valores menores obtidos do volume de vazios e o facto de ter também valores de resistência à deformação permanente em obra menores (ligante mais mole).

Quadro 2.3 - Resultados dos ensaios realizados nos carotes retirados do trecho experimental (Silva et al, 2009)

Tipo de mistura	Norma	MBQ	MBT Sasobit	MBT Cecabase
Percentagem de betume (%)	EN 12697-1	5,0	5,1	5,3
Baridade máx. teórica (kg/m ³)	EN 12697-5	2.418	2.414	2.407
Volume de vazios, Vv (%)	EN 12697-8	2,7	2,0	2,0
Sensibilidade à água, ITSR (%)	EN 12697-12	85,8	85,2	67,0
Resistência à deformação permanente, WTS air (mm/10 ³)	EN 12697-22	0,25	0,69	0,29

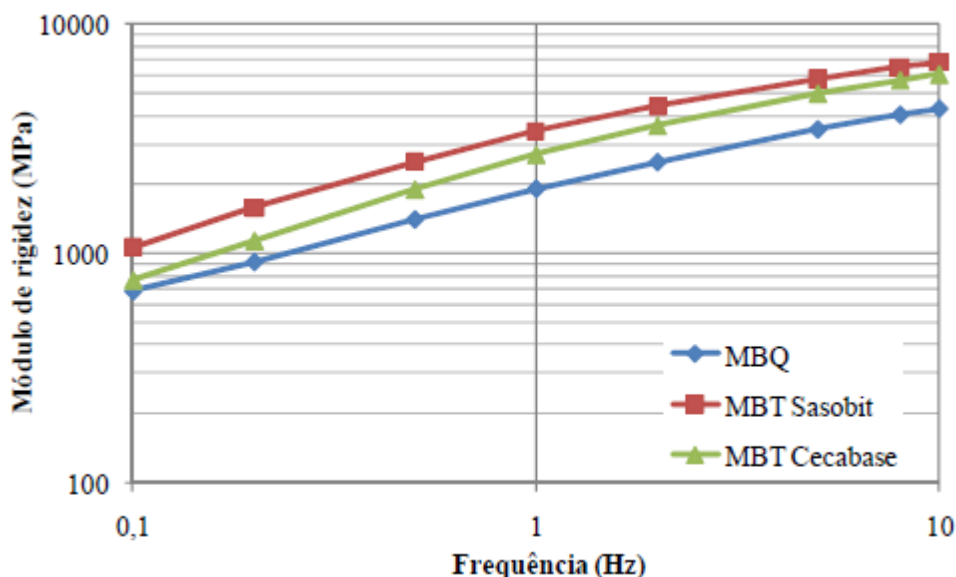


Figura 2.7 - Módulo de deformabilidade das misturas retiradas do trecho experimental (Silva et al, 2009)

No que respeita a análise do módulo de rigidez, observaram que as três misturas apresentam valores típicos das misturas betuminosas convencionais, embora as MBT tenham superado ligeiramente a MBQ (Figura 2.6).

Não foi realizado neste artigo nenhum ensaio que tenha a ver com caracterização à fadiga das misturas.

No artigo Pérez e Pérez (2009), foi comparada uma mistura convencional com uma mistura temperada, as duas do tipo AC 16 Surf 50/70 e composição granulométrica que se pode ver no Quadro 2.4.

Quadro 2.4 – Composição granulométrica das misturas ensaiadas (Pérez e Pérez, 2009)

Peneiro	20	12,5	8	4	2	0,5	0,25	0,125	0,063
% passa	100	84,9	68,4	50,9	37,3	19,4	14,8	10,8	6,7

Não pode ser realizada uma comparação exacta com a mistura estudada nesta dissertação por tratar-se de misturas diferentes (a deste estudo é do tipo AC 20 para camada de base). O tipo de betume é igual nos dois casos (50/70).

O processo de fabrico da mistura temperada usada neste artigo foi não aquecer totalmente os agregados finos, para assim aproveitar a humidade residual na fase de mistura, diferente do processo usado nesta dissertação (adicionar Sasobit). A temperatura de fabrico finalmente usada foi de 95°C.

Os resultados obtidos, assim como as normas utilizadas nos ensaios, descrevem-se no Quadro 2.5.

Quadro 2.5 – Composição granulométrica das misturas ensaiadas (Pérez e Pérez, 2009)

Ensaio	Norma	Mistura convencional	Mistura temperada
Compactação	NLT-159	Marshall	Giratória
Estabilidade		14,8 kN	12 kN
Deformabilidade		2,8 mm	3,2 mm
Baridade aparente		2.392 kg/m ³	2.306 kg/m ³
Sensibilidade à água	UNE EN 12697-12	95%	91%
Ensaio de pista	UNE EN 12697-22	0,075 mm	0,08 mm

É salientado no artigo que para a mistura temperada não foi realizado o ensaio Marshall devido à impossibilidade de aplicar uma correcta compactação por impacto, por causa da

baixa temperatura de fabrico e da presença de uma pequena quantidade de humidade na superfície, resultante do processo, que foi impossível de retirar.

Como solução para isto decidiram fabricar provetes das mesmas dimensões geométricas que os provetes Marshall de mistura convencional, mas usando o processo de compactação giratória.

Pode-se ver no Quadro 2.5 que as características são semelhantes para a mesma composição enquanto aos valores obtidos no laboratório.

Analisando os resultados apresentados, pode falar-se do bom desempenho das misturas quanto à sensibilidade à água (valores grandes do ITSR) e à deformação permanente (valores muito baixos da deformação no ensaio de pista). No que respeita ao resto de propriedades, no artigo é reflectido que cumprem com os requisitos normativos correspondentes.

Neste artigo não foram realizados ensaios mecânicos de nenhum tipo, o que não nos permite comparar com a mistura que se estudou.

De qualquer forma, fica demonstrado nesta secção pelos dois estudos descritos que com as condições enunciadas é possível o fabrico de misturas a temperaturas inferiores às convencionais, mantendo as características próprias das misturas a quente. Claro que se esteve a descrever no primeiro caso (usando Sasobit) uma mistura temperada (fabrico a 140°C) e não morna (fabrico entre 100°C e 120°C), e no segundo caso há um procedimento de fabrico (utilização de finos húmidos) que não foi replicado no estudo que se quis levar a cabo. Isto não invalida o potencial das misturas temperadas e mornas que se quis evidenciar.

3. Descrição dos trabalhos efectuados

3.1. Enquadramento

A mistura analisada neste trabalho foi escolhida seguindo, como já foi assinalado, as orientações emanadas dum estudo mais aprofundado que dará origem a uma tese de doutoramento e que é destinado à caracterização mecânica e tecnológica de misturas mornas para camada de base incorporando resíduos (RCDs - resíduos de construção e demolição, misturas betuminosas recuperadas de pavimentos antigos e escórias de alto forno).

No Quadro 3.1 apresentam-se as características da mistura (tipo AC20 base 50/70 - MB). No Quadro 3.2 está indicada a formulação dos agregados da mistura. O betume usado na mistura betuminosa em estudo é do tipo 50/70, como decorre da sua classificação que se indicou acima.

Quadro 3.1 – Características da mistura

Percentagem de betume	Percentagem de Sasobit	Temperatura de fabrico
3,7%	0,15%	120°C

Quadro 3.2 – Composição granulométrica da mistura

Brita 1	Brita 2	Pó
25%	30%	45%

No essencial, o estudo experimental que se apresenta de seguida pretende caracterizar especificamente esta mistura morna à deformabilidade e à fadiga, dando assim um contributo para a tese de doutoramento cujo objectivo já se descreveu, a qual pretende apoiar a implantação das misturas betuminosas mornas na tecnologia portuguesa.

3.1.1. Equipamento do ensaio de flexão em quatro pontos

No que respeita ao ensaio de fadiga realizado para esta dissertação, foi utilizado o equipamento de flexão em quatro pontos “Stand Alone Four Point Bending Beam”, fabricado pela Cooper Research Technology.

De seguida, tendo como principal referência o trabalho realizado por Crucho (2011), são enumeradas as partes do equipamento e as ligações entre elas. Descreve-se também a função que cada uma das partes realiza no processo.

- Computador e software de ensaio.
- Unidade de controlo.
- Reservatório de ar comprimido.
- Unidade de flexão.
- Unidade de aquisição de dados.
- Câmara climática.

O provete é colocado na unidade de flexão (Figura 3.1) para ser ensaiado. A unidade de flexão encontra-se dentro da câmara climática para regulação da temperatura do ensaio (Figura 3.2).



Figura 3.1 – Unidade de flexão
(Cooper, 2011)



Figura 3.2 – Unidade de flexão no interior da câmara climática

Como o seu nome indica, a unidade de flexão é controlada pela unidade de controlo (Figura 3.3). A esta unidade estão ligados todos os instrumentos de medida, possui duas sondas de temperatura para registo da mesma e controla a abertura e fecho dos mecanismos de fixação do provete.

A unidade de controlo também controla o reservatório de ar comprimido (Figura 3.4), onde é feita a admissão de ar pressurizado que depois é induzido na unidade de flexão.



Figura 3.3 – Unidade de controlo (Crucho, 2011)



Figura 3.4 – Reservatório de ar comprimido (Crucho, 2011)

A unidade de aquisição de dados (Figura 3.5) comunica a unidade de controlo e o computador, através da transmissão dos dados obtidos de aquela para o seu registo no software. Na Figura 3.6 pode ver-se, no software do equipamento, o andamento de um dos ensaios realizados.



Figura 3.5 – Unidade de aquisição de dados (Crucho, 2011)



Figura 3.6 – Computador e software

O software, desenvolvido pela própria CRT, manda as instruções necessárias para a unidade de controlo, em função dos dados obtidos da unidade de aquisição.

3.1.2. Ensaio de flexão em quatro pontos

Seguindo a norma EN 12697, parte 24, são enumeradas de seguida as características do ensaio de flexão em quatro pontos realizado:

- Os dois apoios interiores e os dois exteriores situaram-se simétricos respeito ao centro do provete.
- As vigas deveram ser sujeitas a carregamentos com rotação e translação horizontal livre em todos os apoios.
- Os carregamentos realizados, de tipo sinusoidal, foram aplicados nos dois apoios interiores na direcção vertical, enquanto a posição vertical dos apoios exteriores foi fixada.

No decorrer dos ensaios, para cada um dos provetes, foram medidos os seguintes parâmetros em função do tempo:

- Carregamento necessário para provocar flexão do provete.
- A deflexão que ocorreu.
- O ângulo de fase entre os dois sinais anteriores.

Na Figura 3.7 representam-se os principais parâmetros do ensaio, assim como as características que têm que cumprir-se.

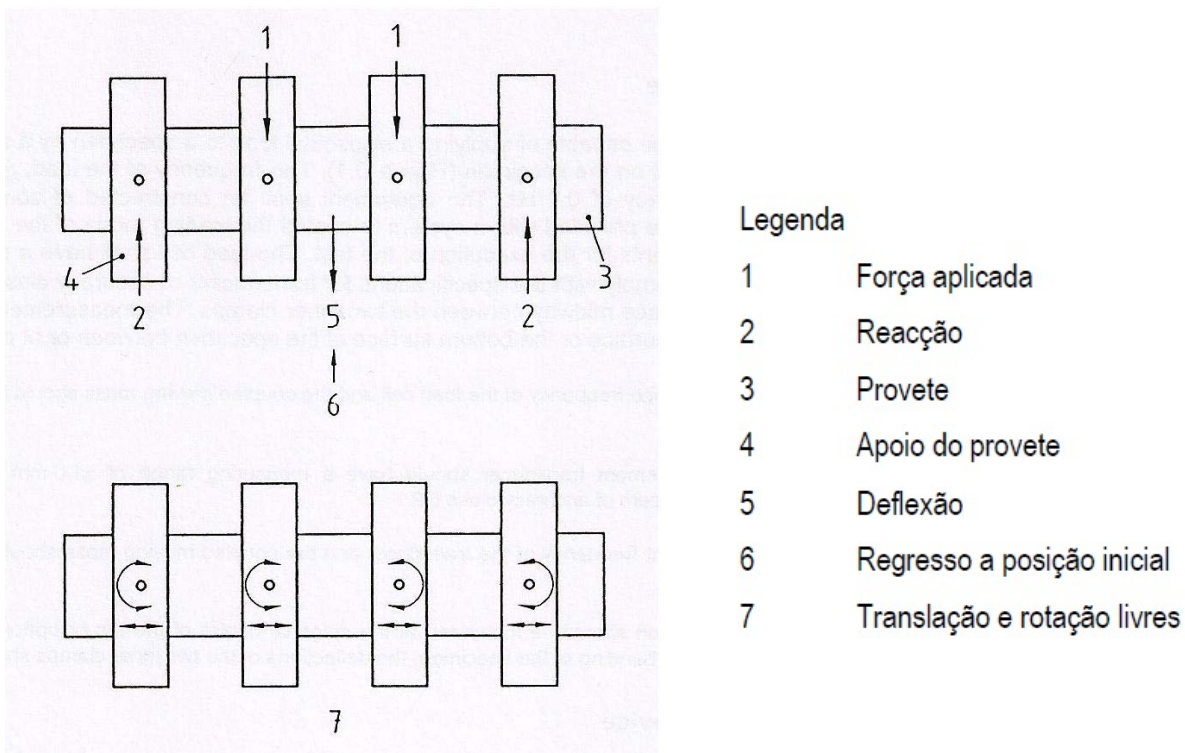


Figura 3.7 – Esquema do ensaio de flexão em quatro pontos (EN 12697-24, 2004)

3.2. Fabrico e caracterização orgânica dos provetes

A parte instrumental desta dissertação começou no LPAV da FCTUC. No dia anterior foram colocadas na estufa, a 120°C, os agregados e o betume para depois serem usados (Figura 3.8). Tirou-se de cada tabuleiro, com a ajuda de uma balança (Figura 3.9), a quantidade deles necessária e juntou-se com as fibras de Sasobit no caldeirão da máquina misturadora. Ligou-se a máquina e manteve-se a misturar uns 5 minutos.



Figura 3.8 – Tabuleiros com agregados na estufa a 120°C



Figura 3.9 – Balança usada no fabrico e fibras de Sasobit

A mistura foi levada ao ISEC e colocada lá numa estufa para manter os 120°C (Figura 3.10). Depois foi depositada num molde com as dimensões finais da laje, 450x450x60 mm³ (Figura 3.11). Na parte de baixo do molde foi colocado um papelão para facilitar a extração.



Figura 3.10 – Tabuleiros com mistura na estufa a 120°C



Figura 3.11 – Espalhamento da mistura no molde

O seguinte passo foi o início da compactação da mistura colocada no molde (Figura 3.12). Foi usado um cilindro de rolos vibradores e realizaram-se várias passagens até se considerar a mistura compactada. No essencial o processo é considerado acabado quando a superfície

exposta da laje fica rasante com o molde (Figura 3.13). A mistura compactada ficou lá toda a noite e só no dia a seguir é que foi tirada fora do molde.



Figura 3.12 – Mistura espalhada no molde antes do início da compactação



Figura 3.13 – Laje rasante com o molde depois de feita a compactação

Este processo repetiu-se três vezes, para cada uma das lajes. No fim tinham-se as lajes preparadas para ser cortadas em vigas de 420 mm de comprimento, 60 mm de largura e 50 mm de altura.

Na Figura 3.14 pode ver-se a máquina que foi usada para cortar as lajes em provetes prismáticos. De cada uma delas obtiveram-se seis provetes, dando um número total de 18. Na Figura 3.15 podem ver-se alguns provetes depois de serem cortadas as lajes.



Figura 3.14 – Máquina usada para corte das lajes



Figura 3.15 – Lajes cortadas em provetes

3.2.1. Restrições geométricas

Em relação a este aspecto tem que dizer-se de que forma influiu no trabalho. A norma diz que a altura dos provetes tem que ser no mínimo 3 vezes a dimensão máxima do agregado (20 mm), o que dá uma altura mínima de 60 mm. Os provetes andavam por volta dos 58 mm e portanto não cumpriam a norma.

Para além disto, surgiu no início dos ensaios outro problema com a altura dos provetes. Ao serem colocados na máquina aconteceu que a abertura máxima dos dispositivos de fixação (Figura 3.16) era de 55 mm e, como os provetes tinham uma altura maior, tiveram de ser cortados uns 5 mm (Figura 3.17). Isto fez afastar-se ainda mais do cumprimento da norma em relação à altura mínima dos provetes, o que pode ter contribuído para resultados não consentâneos com os esperados e tornar a comparação com outras situações menos sólida.



Figura 3.16 – Detalhe da abertura máxima nos dispositivos de fixação



Figura 3.17 – Corte dos provetes para rebaixamento da sua altura

No que respeita à largura dos provetes a norma diz a mesma coisa, tem que ser pelo menos 3 vezes a dimensão máxima do agregado, isto é, uma largura mínima de 60 mm. Neste caso não há problema já que o menor valor entre todos os provetes é de 61,03 mm, maior que o valor mínimo exigido.

Em último lugar, a norma diz que a distância entre os apoios exteriores deve ser no mínimo 6 vezes o maior valor da largura e/ou da altura. Neste caso também não há problema já que 6 vezes 61,77 mm (valor máximo que corresponde ao valor máximo da largura) dá um valor de 370,62 mm, menor que os 424 mm correspondentes ao valor mínimo de comprimento. Note-se que a margem é ainda maior que a diferença entre os dois últimos valores, já que os apoios exteriores não estão mesmo no bordo dos provetes.

3.2.2. Caracterização geométrica

Os provetes foram numerados com dois números separados por um ponto:

- O primeiro número refere à laje a que pertence o provete (pode ser 1, 2 ou 3).
- O segundo número refere o provete (de cada laje obtive-se 6 provetes, portanto este valor pode ser desde 1 até 18).

A primeira caracterização feita com as vigas foi de tipo geométrico. Mediu-se o comprimento, largura e altura de todas elas e depois foram pesadas na balança. Calculou-se no fim o valor médio de todas as medidas, resultados que se apresentam no Quadro 3.3.

Quadro 3.3 – Características geométricas dos provetes

Provete	Comprimento, L (mm)	Largura, B (mm)	Altura, H (mm)
1.1	425,00	61,48	49,65
1.2	424,75	61,77	51,37
1.3	426,00	61,61	49,26
1.4	425,00	61,16	49,51
1.5	425,00	61,36	49,30
1.6	424,75	61,29	49,56
2.7	425,50	61,44	49,90
2.8	425,00	61,59	49,47
2.9	424,50	61,60	49,87
2.10	424,25	61,03	51,39
2.11	424,00	61,56	49,58
2.12	424,25	61,47	49,64
3.13	424,50	61,05	50,18
3.14	425,50	61,41	49,51
3.15	426,00	61,60	50,56
3.16	424,75	61,41	49,69
3.17	425,25	61,31	49,41
3.18	424,50	61,53	48,92

3.2.3. Caracterização física

A seguir, segundo a parte 6 da norma EN 12697 e o procedimento B, calcularam-se a baridade aparente geométrica e a baridade máxima teórica dos provetes. Para isto foi medida a massa deles em três situações diferentes:

- Massa seca. Valor medido à temperatura ambiente.
- Massa imerso. O provete é introduzido num tanque com água e deixado lá uns minutos (até sair o ar que tiver internamente). Nessa altura anota-se o valor da massa.
- Massa superfície molhada. Tira-se o provete do tanque e, com ajuda de um pano, seca-se a superfície. A seguir, anota-se novamente o valor da massa do provete.

Com os valores medidos das masas aplicou-se a Equação 3.1 para cálculo da baridade aparente geométrica e a Equação 3.2 para cálculo da baridade máxima teórica. Os resultados mostram-se no Quadro 3.4.

$$\gamma \left[\frac{kg}{m^3} \right] = \frac{M_{seca}}{V} = \frac{M_{seca}}{B \times H \times L} \quad (3.1)$$

Onde (características todas referidas ao provete de ensaio):

M_{seca}	Massa seca;
V	Volume;
B	Largura;
H	Altura;
L	Comprimento.

$$\delta \left[\frac{kg}{m^3} \right] = \gamma_{agua} \times \frac{M_{seca}}{M_{sm} - M_{im}} \quad (3.2)$$

Onde:

γ_{agua}	Peso específico da água à temperatura do teste;
M_{seca}	Massa seca do provete de ensaio;
M_{sm}	Massa superfície molhada do provete de ensaio;
M_{im}	Massa do provete de ensaio imerso.

Quadro 3.4 – Características físicas dos provetes

Provete	Baridade aparente geométrica, γ (kg/m ³)	Baridade máx. teórica, δ (kg/m ³)
1.1	2.171,49	2.301,03
1.2	2.036,26	2.266,78
1.3	2.147,66	2.292,05
1.4	2.113,01	2.275,66
1.5	2.187,92	2.283,77
1.6	2.167,10	2.289,16
2.7	2.123,81	2.254,35
2.8	2.157,95	2.295,23
2.9	2.132,16	2.306,20
2.10	2.070,26	2.288,22
2.11	2.101,19	2.288,29
2.12	2.229,27	2.325,48
3.13	2.200,99	2.337,73
3.14	2.210,09	2.321,71
3.15	2.091,81	2.302,12
3.16	2.175,61	2.306,74
3.17	2.194,09	2.316,39
3.18	2.199,29	2.301,69

Com a ajuda de um termómetro mediou-se a temperatura da água do tanque, o que deu um valor de 19°C. Com isto o peso específico da água foi corrigido e finalmente considerado 998,5 kg/m³, à temperatura do teste medida (EN 12697-6).

3.3. Caracterização da deformabilidade

Para fazer uma boa caracterização à deformabilidade da mistura vai seguir-se o que é indicado na norma EN 12697 parte 26, onde são ditas as condições do ensaio que devem ser adoptadas.

Estas condições, junto com a composição da mistura betuminosa, vão influenciar as características à deformabilidade que a mistura vai ter (Baptista, 2006).

A escolha das condições de ensaio é portanto o parâmetro a definir, já que a composição da mistura no nosso caso é dada, e salienta-se como muito importante a realização de um bom trabalho neste aspecto.

Concretamente para o ensaio de deformabilidade, deve-se determinar a temperatura, a frequência e o modo de carregamento que se ajustem às que os pavimentos suportam no sítio onde vão ser colocados, neste caso em Portugal.

3.3.1. Escolha da temperatura

A temperatura influencia em grande medida os valores do módulo de deformabilidade e do ângulo de fase da mistura. Tratam-se de ensaios não destrutivos por se realizarem no âmbito das pequenas deformações e ser aplicado um número baixo de ciclos.

Na norma EN 12697, parte 24, são definidas as duas propriedades:

- O módulo de deformabilidade, ou módulo de rigidez, define a relação entre tensão e deformação do provete (de material viscoelástico) sujeito a uma carga sinusoidal.
- O ângulo de fase é o ângulo em graus durante um ciclo entre a tensão e a deformação do provete.

Seguindo o dito anteriormente, e tendo em conta que intervalo de temperaturas de referência para toda a espessura das camadas betuminosas em Portugal está entre os 20°C e os 30°C (Picado-Santos et al, 2010), foi decidido realizar os ensaios a 20, 30 e 40°C, sendo que esta última permite perceber a resposta em situações mais gravosas.

3.3.2. Escolha da frequência

No que respeita à frequência de carregamento, a norma EN 12697- 24 diz que deve estar no intervalo entre 0,1 Hz e 50 Hz, com uma exactidão de 0,1 Hz. Assim, recomenda uma série de valores que são tipicamente considerados: começa em 0,1 Hz, segue com 0,2 Hz, 0,5 Hz, 1 Hz, 2 Hz, 5 Hz, 10 Hz, 20 Hz, 50 Hz e acaba com o mesmo valor que começou (0,1 Hz) para verificar que o provete não foi danificado no decorrer dos carregamentos às diversas frequências.

O valor da rigidez (módulo de deformabilidade) do provete na primeira e última medida à mesma frequência não pode diferir mais do 3%. Se isso acontecer o ensaio com esse provete será excluído e não tido em conta para fazer a média.

No caso vertente foi decidido caracterizar a rigidez da mistura com três frequências: 1 Hz, 5 Hz e 10 Hz. Assim evitaram os problemas das frequências extremas, como eventualmente o fenómeno de ressonância a altas frequências e a destruição do provete se porventura estiver geometricamente imperfeito o que seguramente aconteceria para frequências superiores a 10 Hz. Acresce que frequências superiores a este valor não representam convenientemente a velocidade real média de aplicação das cargas. Por exemplo, aproximadamente, 20 Hz corresponde (Shell, 1990) a uma velocidade de circulação dos veículos pesados de 133 km/h, o que é irrealista.

Note-se que não foi repetido para finalizar o ensaio com cada provete o teste com o valor de frequência 1 Hz porque a gama ensaiada era curta logo não foi considerado necessário.

3.3.3. Modo de carregamento

Existem dois modos diferentes de carregamento que o software do equipamento permite escolher (Figura 3.18).

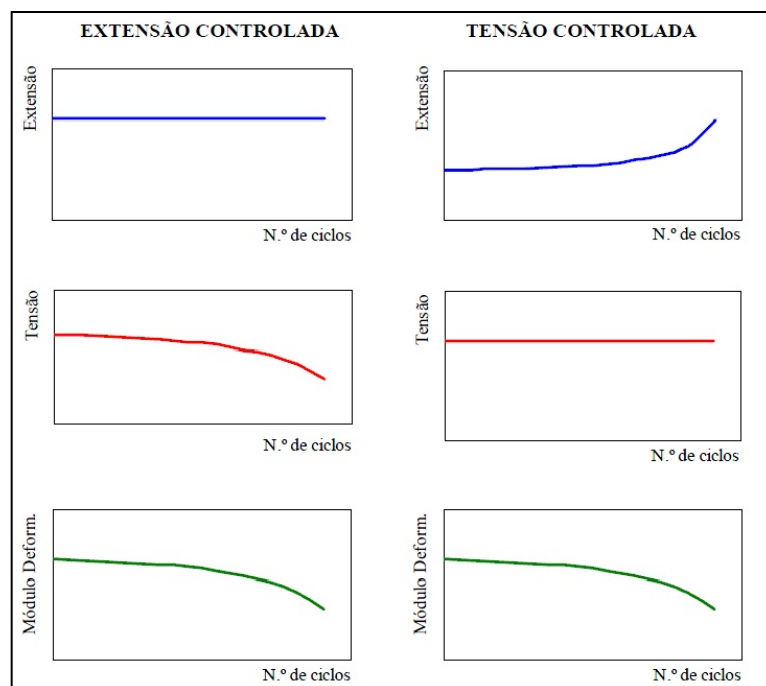


Figura 3.18 – Modos de carregamento disponíveis no software dos ensaios (Baptista, 2006)

No modo de extensão controlada é fixada a amplitude do deslocamento que nos dá a extensão desejada, diminuindo a tensão no decorrer do ensaio. Pelo contrário, no modo de tensão controlada é fixada a amplitude da carga que nos dá a tensão desejada, aumentando a extensão no decorrer do ensaio.

Evidentemente, o módulo de deformabilidade diminui em ambos os modos na medida que o número de ciclos vai aumentando.

Foi escolhido o modo de carregamento de extensão controlada (Controlled Strain) com uma amplitude máxima de deformação por flexão de 50 $\mu\text{m}/\text{m}$, compatível com o que é indicado na norma EN 12697 parte 26. Também porque não havia muitos provetes disponíveis, foi conveniente que o ensaio de módulo os poupasse (extensão de ensaio baixa para isso contribui) de modo a aproveitar alguns deles também para o ensaio de fadiga.

Nas figuras 3.19 a 3.21 representam-se os resultados obtidos, separando os valores do módulo para cada provete em função da temperatura de ensaio. São as chamadas curvas isotérmicas do módulo, que vão permitir avaliar a influência da frequência nos parâmetros de deformabilidade, para as diferentes temperaturas de ensaio.

Como habitualmente, observa-se um aumento do módulo com o incremento da frequência de carregamento.

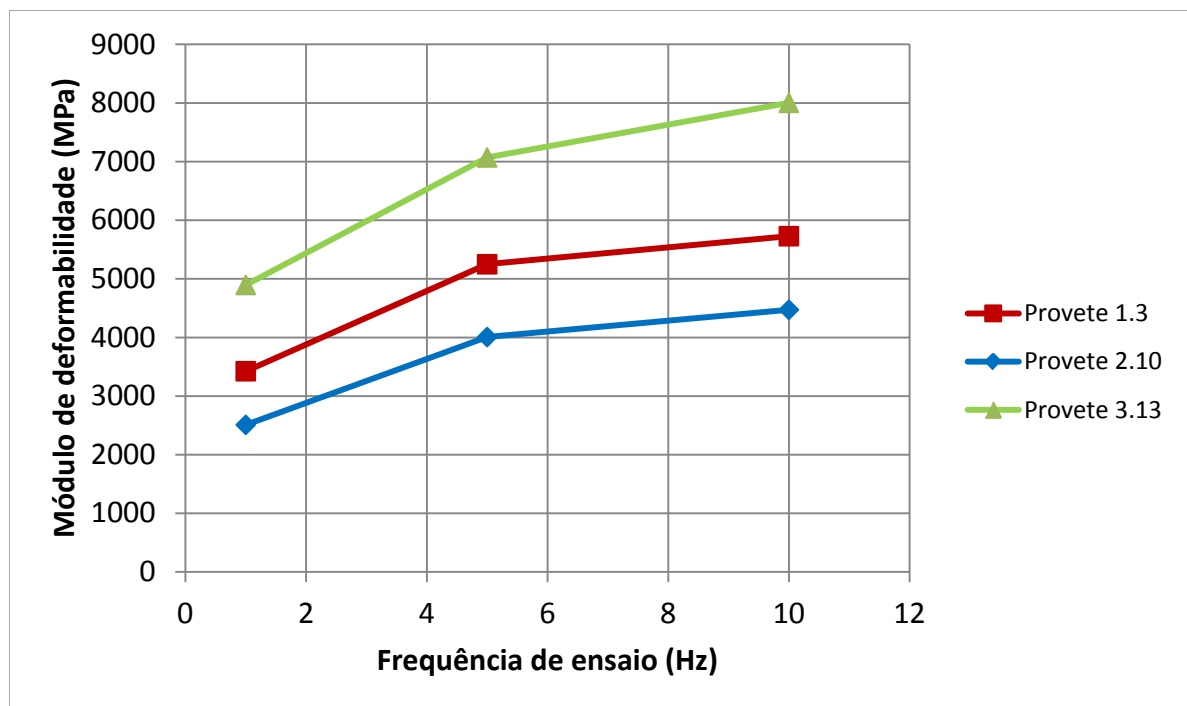


Figura 3.19 – Módulo de deformabilidade a 20°C

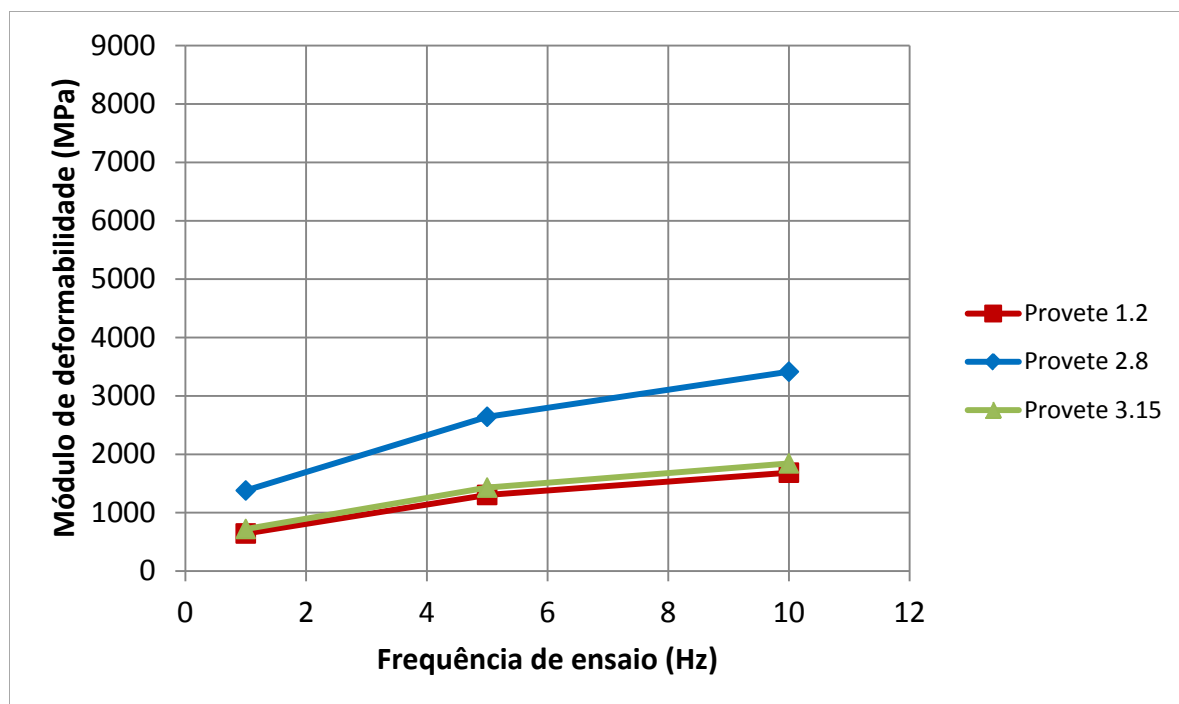


Figura 3.20 – Módulo de deformabilidade a 30°C

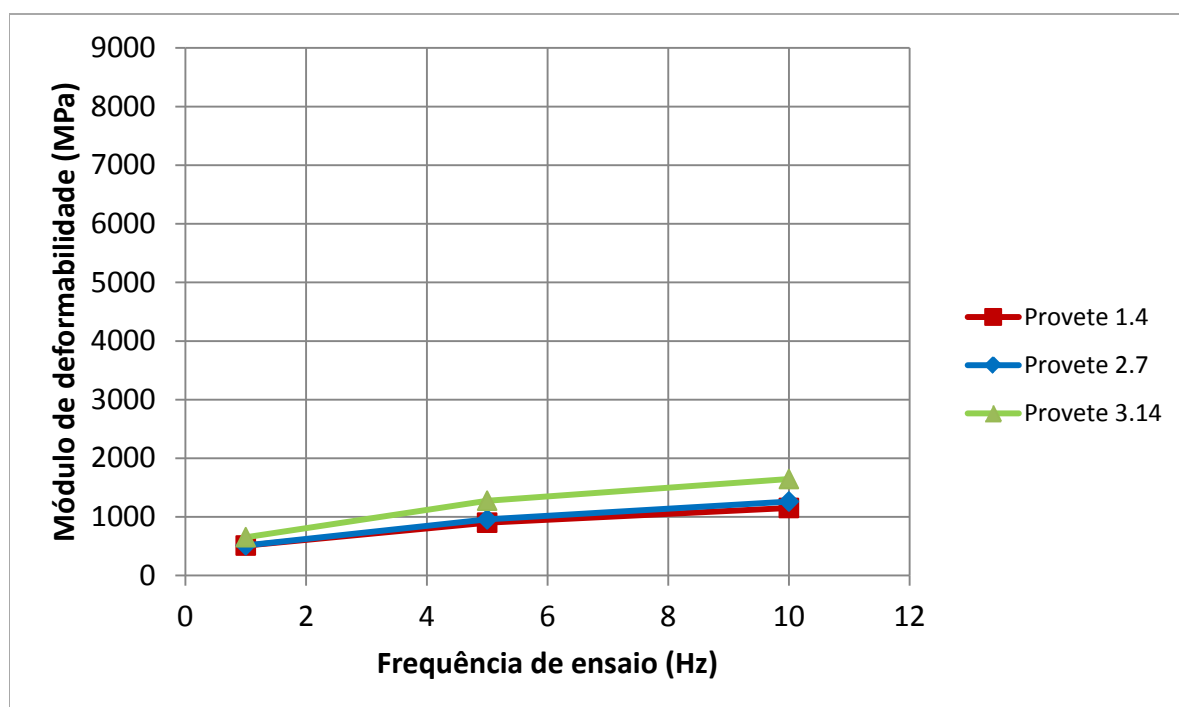


Figura 3.21 – Módulo de deformabilidade a 40°C

Nos Quadros 3.5 a 3.7 podem ver-se os valores numéricos do módulo de deformabilidade que foram representados nas Figuras 3.19 a 3.21.

Quadro 3.5 – Resultados do ensaio de módulo de deformabilidade a 20°C

Temperatura (°C)	Provete	Frequência (Hz)	Módulo (MPa)
20	1.3	1	3.425
		5	5.250
		10	5.728
	2.10	1	2.510
		5	4.007
		10	4.472
	3.13	1	4.896
		5	7.071
		10	8.003

Quadro 3.6 – Resultados do ensaio de módulo de deformabilidade a 30°C

Temperatura (°C)	Provete	Frequência (Hz)	Módulo (MPa)
30	1.2	1	643
		5	1.303
		10	1.685
	2.8	1	1.380
		5	2.643
		10	3.415
	3.15	1	721
		5	1.430
		10	1.844

Quadro 3.7 – Resultados do ensaio de módulo de deformabilidade a 40°C

Temperatura (°C)	Provete	Frequência (Hz)	Módulo (MPa)
40	1.4	1	511
		5	901
		10	1.152
	2.7	1	514
		5	957
		10	1.262
	3.14	1	653
		5	1.276
		10	1.646

Nas Figuras 3.22 a 3.24 representam-se as curvas isócronas do módulo, que vão permitir avaliar a influência que tem a temperatura nos parâmetros de deformabilidade, para cada uma das frequências de ensaio.

Também como esperado, observa-se uma elevada susceptibilidade térmica das misturas betuminosas já que diminui o módulo de deformabilidade com o aumento da temperatura mantendo-se a frequência de ensaio.

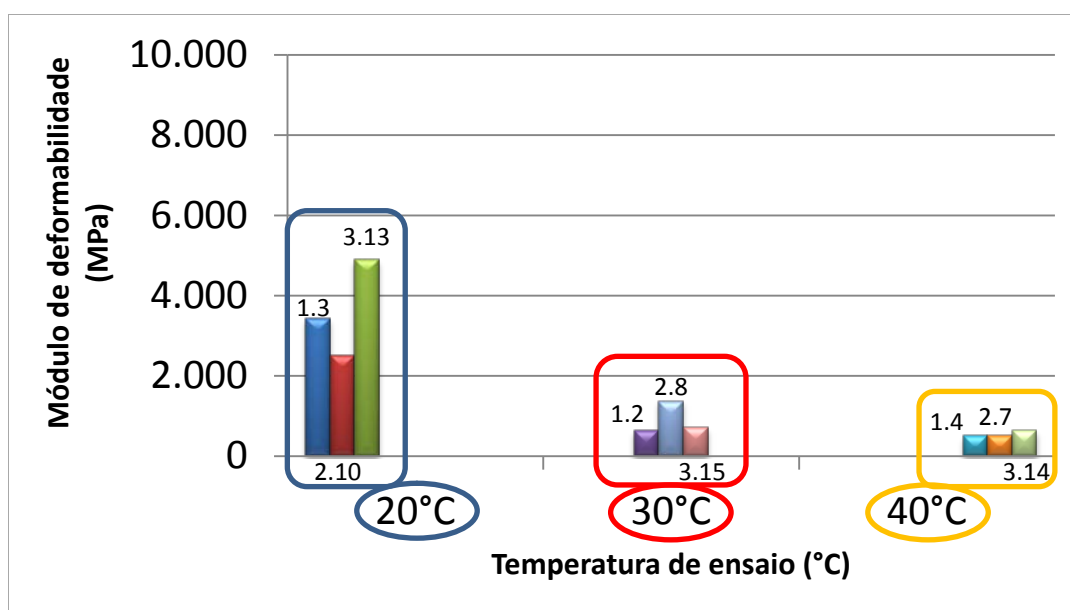


Figura 3.22 – Módulo de deformabilidade a 1 Hz

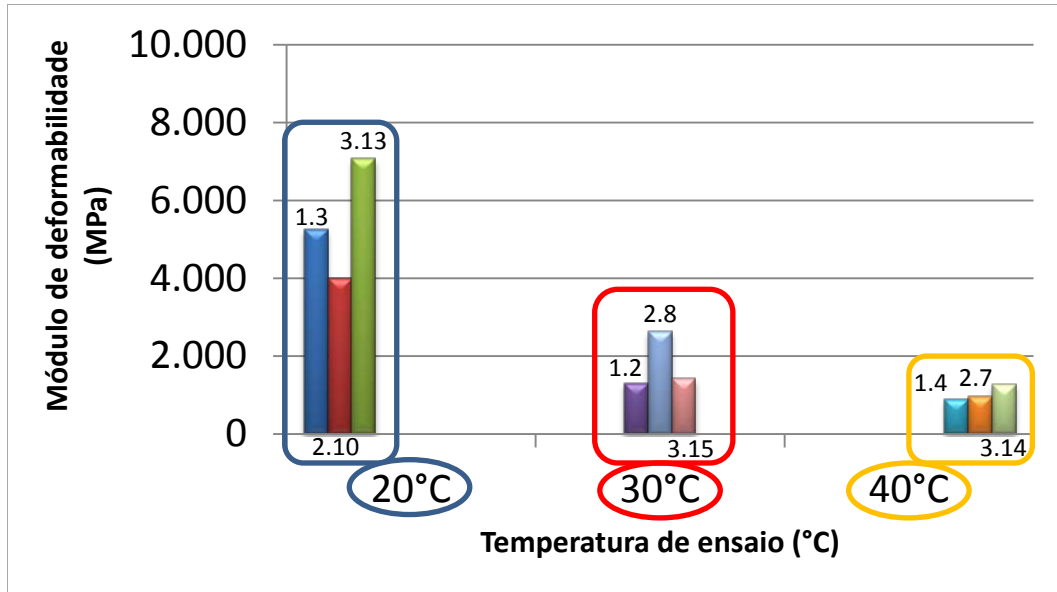


Figura 3.23 – Módulo de deformabilidade a 5Hz

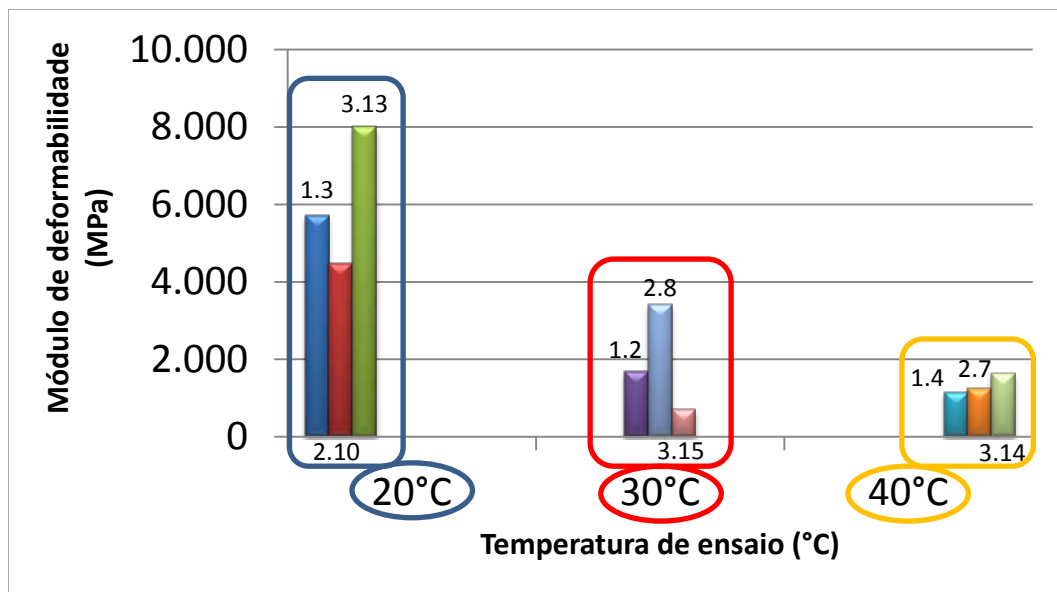


Figura 3.24 – Módulo de deformabilidade a 10 Hz

Como comentário geral, pode dizer-se que os valores encontrados para os módulos de deformabilidade da mistura estudada estão alinhados com o que era expectável para uma mistura deste tipo.

3.4. Caracterização da fadiga

A fadiga é a redução da resistência de um material sob um carregamento repetido quando é comparada com a resistência sob aplicação de uma única carga (EN 12697-24, 2004).

Para fazer uma boa caracterização da mistura à fadiga seguir-se-á o que é indicado na norma EN 12697, parte 24.

O ensaio de fadiga apresenta uma série de diferenças em relação ao ensaio de deformabilidade, apesar de ser usado o mesmo equipamento de flexão em quatro pontos:

- Trata-se de um ensaio destrutivo.
- Usaram-se diferentes valores da extensão (70, 110 e 150 μm).
- A temperatura foi constante para todos os ensaios nos diferentes níveis ($T=20^{\circ}\text{C}$).
- A frequência foi constante para todos os ensaios nos diferentes níveis ($f=10\text{ Hz}$).
- O módulo de deformabilidade vai diminuindo até atingir um valor 50% do módulo inicial, critério escolhido para finalização do ensaio.

Os diferentes níveis escolhidos para a extensão, assim como também os valores atribuídos à temperatura e à frequência, foram estabelecidos de forma a que o número de repetições para a extensão de ensaio mais baixa permitisse que cada ensaio não tivesse uma duração muito acima de 24 horas.

O valor do módulo inicial é calculado no início do ensaio, através da realização de 100 ciclos para a sua determinação (EN 12697-24).

É preciso salientar agora que não foi cumprido o requisito da norma que diz que o ensaio tem que ser repetido 6 vezes para cada nível da extensão, o que levaria à necessidade de dispor de 18 provetes só para fadiga.

No início decidiu-se fazer 3 ensaios para cada valor, em geral suficientemente representativo. No decorrer dos mesmos descobriu-se que em alguns casos, para o mesmo valor da extensão, o número de ciclos que os provetes aguentavam estava a dar muito diferente. Nesta altura considerou-se a possibilidade de fazer mais ensaios às diferentes extensões, reaproveitando provetes já usados no ensaio de deformabilidade.

Só foram usados os provetes já ensaiados a 20°C para cálculo do módulo de modo a minimizar a possibilidade deste ensaio ter, apesar dos cuidados assinalados, introduzido algum dano nos provetes.

Tem-se portanto 9 provetes usados exclusivamente para fadiga mais 3 provetes reaproveitados do ensaio de deformabilidade, o que permitiu para cada nível de extensão repetir 4 vezes o ensaio de fadiga. No Quadro 3.8 apresentam-se os resultados que se obtiveram.

Quadro 3.8 – Resultados do ensaio de fadiga

Extensão (μm)	Nº de ciclos	Provetes	Outros ensaios
70	450.496	1.5	-
	1.944.052	2.10	Módulo a 20°C
	1.533.049	2.11	-
	512.620	3.18	-
110	76.275	1.6	-
	268.713	2.9	-
	295.875	3.13	Módulo a 20°C
	284.701	3.17	-
150	61.735	1.1	-
	15.966	1.3	Módulo a 20°C
	25.392	2.12	-
	56.333	3.16	-

No Quadro 3.9 é feita uma comparação entre o valor do módulo obtido no ensaio de deformabilidade a 10 Hz e 20°C e o valor inicial do módulo obtido no ensaio de fadiga nas mesmas condições de temperatura e frequência.

Nenhum dos provetes foi ensaiado exactamente nas mesmas condições. No caso dos provetes 1.3, 2.10 e 3.13 mantiveram-se constantes todos os parâmetros, só a extensão é que foi diferente (passou de 50 μm no ensaio de módulo para 70, 110 e 150 μm respetivamente no ensaio de fadiga).

Observa-se que apesar de mudar as amplitudes, mantendo constantes a temperatura e a frequência os valores do módulo de deformabilidade saíram muito semelhantes.

As diferenças que ocorreram, mesmo no caso de manter-se a amplitude, podem ser devidas ao facto do provete já não ser novo estruturalmente.

Quadro 3.9 – Resultados do módulo de deformabilidade a 10 Hz e 20°C

Provete	Extensão (μm)	Ensaio	Módulo (MPa)
1.3	70	Fadiga	5.438
	50	Deformabilidade	5.728
2.10	110	Fadiga	5.101
	50	Deformabilidade	4.472
3.13	150	Fadiga	8.827
	50	Deformabilidade	8.003

Nas Figuras 3.25 a 3.27 são apresentados os andamentos dos ensaios de fadiga dos provetes mencionados no Quadro 3.9. A construção destes gráficos foi realizada com base nos ficheiros de registo de dados produzidos pelo software de ensaio.

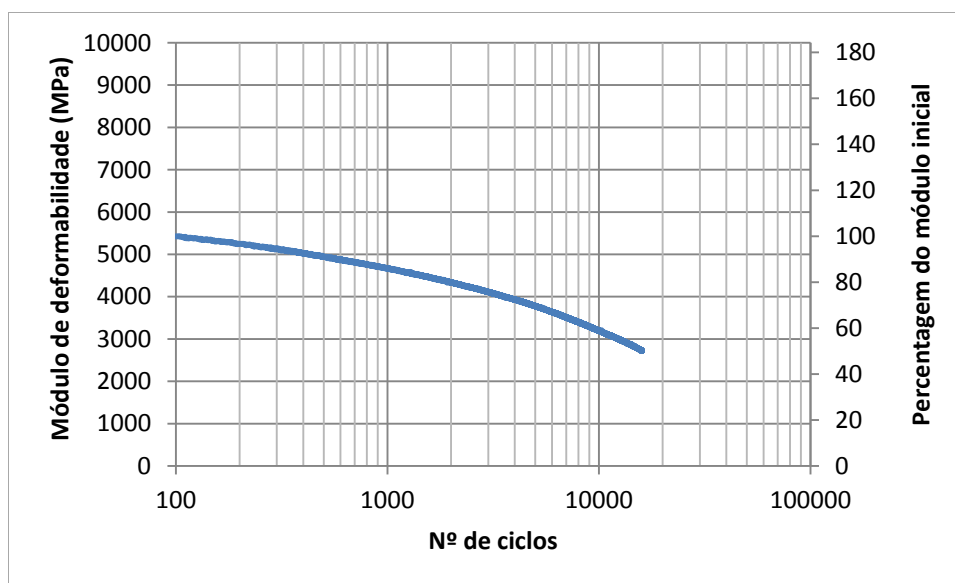


Figura 3.25 – Ensaio de fadiga do provete 1.3

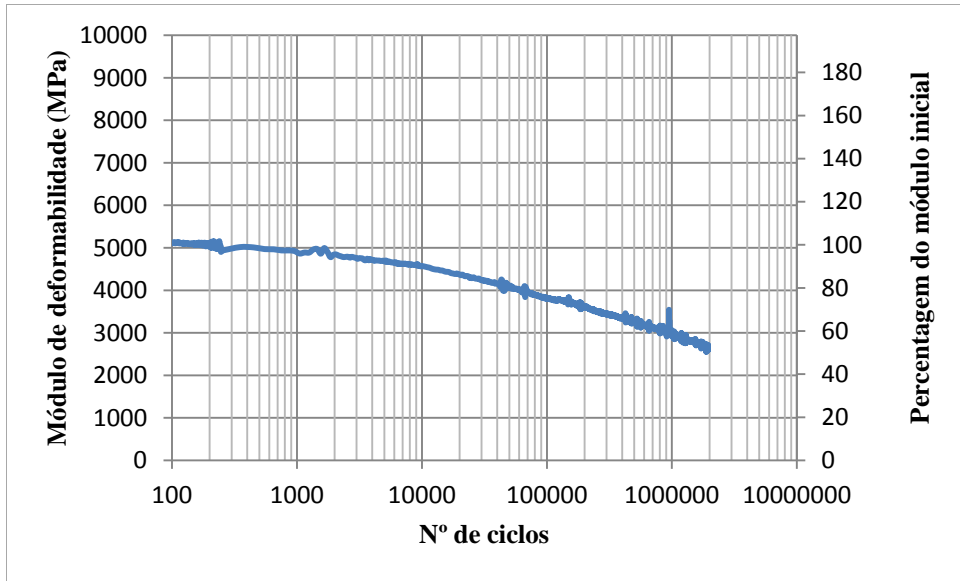


Figura 3.26 – Ensaio de fadiga do provete 2.10

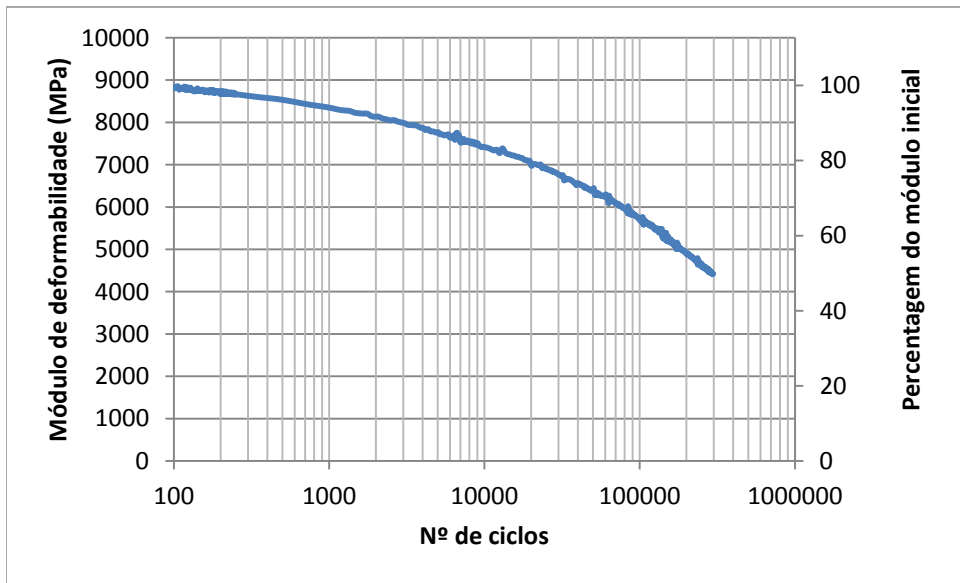


Figura 3.27 – Ensaio de fadiga do provete 3.13

Para poder analisar o desempenho da mistura, vai obter-se as expressões das leis de fadiga para pavimentos flexíveis propostas por duas instituições, as quais, em geral, têm acolhimento na tecnologia portuguesa:

- Shell.
- Junta Autónoma de Estradas (JAE).

As leis de fadiga são geralmente expressões do tipo:

$$\varepsilon = a \times N^b \quad (3.3)$$

Trata-se de relacionar a extensão de tracção (ε) com o número de ciclos de carga no final do ensaio (N). Os parâmetros a e b são obtidos com os resultados correspondentes a cada situação.

Algumas formas da lei desagregam os parâmetros de calibração para fazer intervir directamente indicadores da quantidade de betume, do tipo de betume e da rigidez da mistura.

Por exemplo, a expressão da Shell para a lei de fadiga é a seguinte:

$$\varepsilon_t = (0,856 \times V_b + 1,08) \times E_m^{-0,36} \times N_{80}^{-0,2} \quad (3.4)$$

Onde:

- ε_t Extensão de tracção (adimensional);
- N_{80} Número de eixos padrão de 80 kN;
- V_b Percentagem volumétrica de betume no volume total;
- E_m Módulo de deformabilidade da mistura betuminosa (Pa).

Introduzindo os valores da percentagem volumétrica de betume ($V_b=8,3\%$, calculada com $3,7\%$ de percentagem de betume, 2.300 kg/m^3 de baridade aparente média e $1,03$ de densidade do betume) e do valor médio do módulo de deformabilidade da mistura ($E_m= 6.300 \text{ MPa}= 6,3 \times 10^9 \text{ Pa}$), a expressão da Shell fica assim:

$$\varepsilon_t = 0,002428 \times N_{80}^{-0,2} \quad (3.5)$$

Para obter a lei de fadiga da Shell só resta fazer 1,25 vezes a expressão calculada, factor de correcção necessário por causa de termos uma mistura com baixa percentagem de betume (Branco et al, 2008):

$$\varepsilon_t = 0,003035 \times N_{80}^{-0,2} \quad (3.6)$$

A expressão da JAE para a lei de fadiga é a geral dada pela Equação 3.3. No que respeita aos parâmetros, escolheu-se para a o valor mais conservativo ($a=3 \times 10^{-3}$) e para b o valor proposto pela JAE ($b=-0,2$). Com isto, a expressão final fica assim (praticamente coincidente com a da Shell):

$$\varepsilon_t = 0,003 \times N_{adm}^{-0,2} \quad (3.7)$$

Na norma EN 12697-24 admite o expressar dos resultados de duas formas diferentes, as quais permitem obter uma série de parâmetros para poder comparar o desempenho de misturas betuminosas mais proficientemente.

A primeira forma é através do cálculo da "recta" de fadiga ou seja a lei de fadiga tradicional mas usando logaritmos naturais. É dito na norma que para o critério de rotura escolhido j e para o conjunto de condições de ensaio k , a lei de fadiga deve ser traçada fazendo uma regressão linear entre os logaritmos naturais do número de ciclos e os logaritmos naturais da amplitude inicial (ao centésimo ciclo) de deformação:

$$\ln(N_{i,j,k}) = A_0 + A_1 \times \ln(\varepsilon_i) \quad (3.8)$$

Onde:

- i Número do provete;
- j Critério de rotura escolhido;
- k Conjunto das condições de ensaio;
- $N_{i,j,k}$ Duração da vida do provete i para o critério escolhido j e o conjunto de condições de ensaio k ;
- A_0 Estimativa do nível de carregamento, Q ;
- A_1 Estimativa da inclinação da linha de fadiga;
- ε_i Amplitude inicial de extensão medida no centésimo ciclo de carga.

No caso em estudo a lei obtida é a seguinte:

$$\ln(N_{i,j,k}) = 32,297 - 4,3 \times \ln(\varepsilon_i) \quad (3.9)$$

O parâmetro principal para comparação que se extrai daqui é a inclinação da linha de fadiga, $A_1 = -4,3$.

A segunda forma é obtendo a lei de fadiga com a expressão geral dada pela Equação 3.3.

Para representar os pontos correspondentes à mistura em estudo, calcula-se o valor médio das quatro medidas realizadas com cada extensão. Assim obtém-se três pontos que através de uma interpolação potencial permite determinar a referida lei.

Como se pode ver na Figura 3.28, a lei de fadiga obtida é a seguinte:

$$\varepsilon = 1728,8 \times N^{-0,228} \quad (3.10)$$

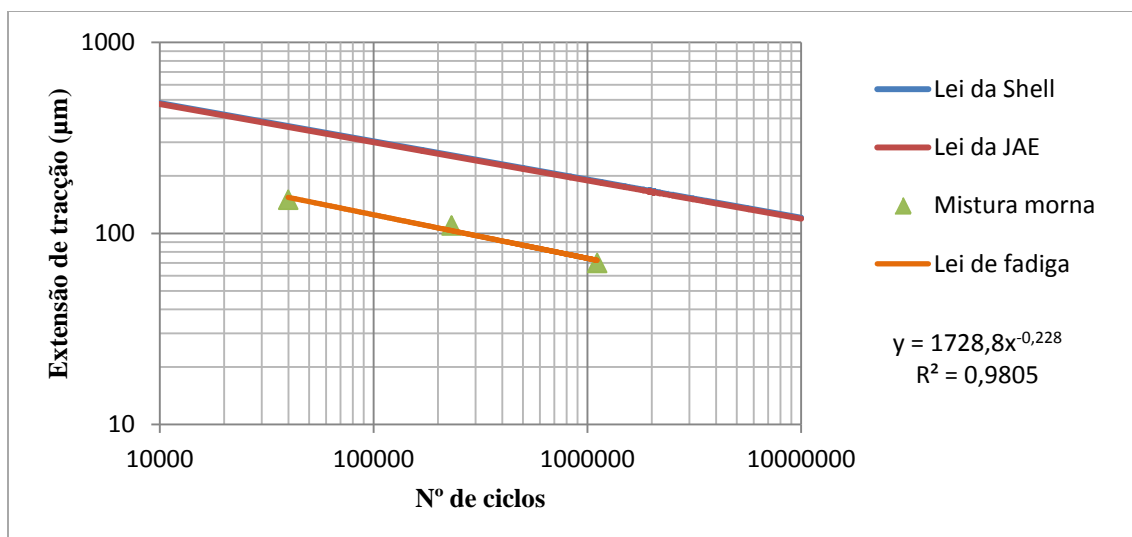


Figura 3.28 – Representação da lei de fadiga e das leis da Shell e da JAE

Da Equação 3.10 calcula-se o valor ϵ^6 , extensão do material ao milhão de ciclos ($N=10^6$), o que dá um valor de:

$$\epsilon^6 = 74 \frac{\mu m}{m}$$

Os resultados complementares da resistência à fadiga pedidos pela norma EN 12697-24 apresentam-se no Quadro 3.10.

Quadro 3.10 – Resultados complementares da resistência à fadiga

ϵ^6 (µm/m)	Inclinação da linha de fadiga
74	-4,3

3.5. Comparação com misturas tradicionais

Para poder comparar o comportamento da mistura em estudo com outros para misturas tradicionais do mesmo tipo vai usar-se as referências Baptista (2006) e Picado-Santos et al (2010).

Embora a comparação a efectuar não seja totalmente justa para a mistura em estudo porque a composição das misturas não é a mesma (a percentagem de betume, por exemplo, é maior no caso da mistura proveniente das referências indicadas), vai pelo menos ser possível inferir o comportamento genérico da mistura em estudo.

As misturas que se escolheram para comparar foram misturas que se vão designar por A (AC20 base 35/50 - MB), E (AC20 base 50/70 - MB reciclado 30) e F (AC20 base 50/70 - MB reciclado 40), as quais apresentam as características que se podem ver no Quadro 3.11.

Quadro 3.11 – Características das misturas de referência (Baptista, 2006 e Picado-Santos et al, 2010)

Designação neste estudo	Designação consulta	TR (%)	Tipo de betume	pb _{final} (%)	pb _{novo} (%)
A	LA	0	35/50	4,2	4,2
E	LE	30	50/70	4,2	3,0
F	LF	40	50/70	4,2	2,6

Como se pode perceber do Quadro 3.11, a comparação que se pode fazer é só aproximada atendendo a que se tem dados dum macadame betuminoso (MB), mistura A, do mesmo tipo da mistura estudada mas com maior percentagem de betume (4,2% em lugar de 3,7%) e fabricado com um betume mais duro (35/50 em lugar de 50/70), e dados de dois outros MB também com maior percentagem de betume embora este seja do mesmo tipo (50/70) mas tendo incluído percentagens elevadas de material fresado (30% no caso da mistura E e 40% no caso da mistura F).

Em termos de módulo de deformabilidade, as frequências usadas (1, 5 e 10 Hz) são as mesmas que as usadas neste estudo embora a extensão alvo seja diferente (100 µm para as misturas de comparação e 50 µm para este estudo). As temperaturas de ensaio também foram diferentes: 20, 30 e 40°C para a mistura deste estudo; 15, 25 e 40°C para as misturas de comparação. Para os dois estudos o valor do módulo às diferentes frequências é a média de três provetes.

Apresentam-se no Quadro 3.12 os resultados do módulo de deformabilidade só para a frequência de 10 Hz que é aquela que em geral é usada para caracterizar as misturas betuminosas. A mistura denominada M foi a que se ensaiou no decorrer deste trabalho.

Quadro 3.12 – Resultados do módulo de deformabilidade (10 Hz) da mistura em estudo e das misturas de comparação

Mistura	Módulo (MPa)		
M	6.068 (20)	2.315 (30)	1.353 (40)
A	7.071 (15)	3.401 (25)	1.078 (40)
E	11.136 (15)	7.897 (25)	4.085 (40)
F	9.763 (15)	7.992 (25)	4.460 (40)

(os valores entre parêntesis são a temperatura de ensaio)

Fazendo o cálculo dos módulos de deformabilidade usando o método da Shell (Shell, 1990) para a mistura em estudo obtinha-se os valores que se podem ver no Quadro 3.13.

Quadro 3.13 – Resultados do módulo de deformabilidade da mistura em estudo calculado pelo método da Shell

Mistura	Módulo Shell (MPa)		
M	9.556 (20)	3.848 (30)	1.016 (40)

(os valores entre parêntesis são a temperatura de ensaio)

Pode verificar-se do Quadro 3.12 que os valores do módulo para a mistura em estudo são muito semelhantes aos obtidos para a mistura A apesar da diferença de extensão de ensaio (que se vai considerar desprezável já que se está claramente no domínio elástico para quaisquer das extensões usadas) mas principalmente de betumes e temperaturas de ensaio. Aliás pode ver-se que à mesma temperatura (40 °C) a mistura em estudo até apresenta um comportamento melhor, o que significa que a diferença entre a viscosidade dos betumes talvez seja parcialmente compensada pela diferença entre a percentagem de betume nas duas misturas.

Os resultados do Quadro 3.13 representam só uma curiosidade para se poder comparar com os valores em análise mas deve dizer-se que a fórmula da Shell pode apresentar variações significativas ("±" x 2, Shell, 1990) que dependem do tipo de combinação das propriedades volumétricas da mistura, pelo que se pode concluir que os resultados verificados com o estudo não diferem desmesuradamente da fórmula de previsão mais usada na tecnologia portuguesa.

Claro que para as misturas E e F os resultados são diferentes mas tratam-se de misturas cujo betume final é muito mais viscoso que o 50/70 da mistura M, o que justifica as diferenças, inclusive em relação à mistura A.

No que respeita à fadiga, mostram-se os parâmetros (a,b) das leis de fadiga e a extensão de tracção correspondente a um milhão de ciclos (ϵ^6) no Quadro 3.14. As leis foram obtidas nas mesmas condições excepto para as misturas de comparação em que a temperatura usada foi de 25 °C.

Quadro 3.14 – Parâmetros representativos da lei de fadiga para as misturas em comparação

Mistura	a	b	ϵ^6 ($\mu\text{m/m}$)
M	1.728,8	-0,228	74
A	2.717,2	-0,181	223
E	2.743,0	-0,170	262
F	3.492,5	-0,187	264

Na Figura 3.29 são apresentadas as leis de fadiga para uma melhor compreensão das diferenças.

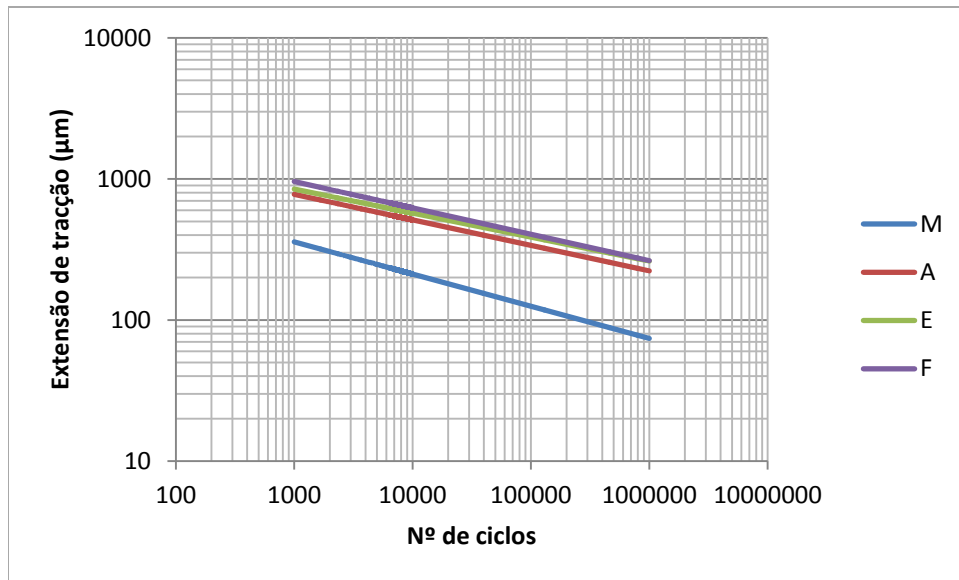


Figura 3.29 – Representação das leis de fadiga das misturas em comparação

Dos resultados pode concluir-se, como esperado, que no comportamento à fadiga a percentagem de betume tem um papel decisivo o que justifica um bastante pior comportamento da mistura M em relação às restantes. Isto, no entanto, é atenuado porque a temperatura de ensaio para a mistura deste estudo foi de 20 °C o que são condições mais gravosas que os 25 °C usados para as restantes.

Em jeito de síntese pode dizer-se que a mistura M apresenta um comportamento à deformabilidade na linha doutras misturas do mesmo tipo e um comportamento à fadiga relativamente fraco, muito comandado pela baixa percentagem de betume usada no seu fabrico, o que também deu origem a baridades relativamente baixas (Quadro 3.4) e porosidades relativamente elevadas (assinaladas pelo trabalho de doutoramento que esteve na base da escolha da mistura estudada) já que foram obtidos valores da ordem dos 5,7%. Estes últimos parâmetros também contribuem para o comportamento à fadiga assinalado.

4. Conclusões e trabalhos futuros

4.1. Conclusões gerais

Neste trabalho pretendeu-se contribuir para o desenvolvimento de misturas betuminosas mornas, cuja temperatura de fabrico não ultrapassa 120 °C, para camada de base. Para isso fabricaram-se uma série de provetes prismáticos que depois foram ensaiados a deformabilidade e a fadiga, permitindo a caracterização da mistura e a classificação do seu desempenho.

Os ensaios foram realizados seguindo algumas das partes da norma EN 12697 (nomeadamente a parte 24 para fadiga e a parte 26 para deformabilidade) e usando um equipamento de flexão em quatro pontos.

Para a parte da deformabilidade realizaram-se 9 ensaios, variando a temperatura a 20°C, 30°C e 40°C e a frequência a 1 Hz, 5 Hz e 10 Hz. A amplitude das extensões foi fixada a 50 µm.

Para a parte da fadiga realizaram-se 12 ensaios, fixando a temperatura a 20°C e a frequência a 10 Hz. Em cada um deles a amplitude das extensões foi também fixada a 70 µm, 110 µm e 150 µm, fazendo-se portanto 4 repetições por nível.

Os objectivos foram atingidos após a comparação dos resultados com outros extraídos de outros trabalhos, podendo ser demonstrada a baixa resistência à fadiga da mistura em estudo, esperada pela baixa quantidade de betume, e um comportamento em termos de deformabilidade semelhante ao de misturas tradicionais do mesmo tipo.

Tudo isto com certa variabilidade pelo facto de não ter umas misturas tradicionais com a mesma composição que a mistura em estudo para poder fazer uma comparação mais exacta, embora melhorado pelo facto de algumas das condições de ensaio da mistura em estudo serem mais desfavoráveis do que as das misturas de referência. O prazo de execução desta dissertação não deu para fabrico das ditas misturas tradicionais. Também se recorreu a leis previsionais habitualmente usadas para estimar a fadiga e assim melhor avaliar a mistura em estudo.

4.2. Trabalhos futuros

O estudo do desenvolvimento das misturas betuminosas mornas que está a decorrer no âmbito duma tese de doutoramento e para a qual se tentou dar contributo com esta

dissertação tem ainda um longo caminho por andar até chegar à sua implementação na tecnologia portuguesa.

Pode-se enumerar uma série de decisões a adoptar no futuro para melhor atingir os objectivos:

- Estudar o comportamento de outras formulações de misturas mornas, nomeadamente com uma maior quantidade de betume, pelo facto de este ser um factor importante para o baixo desempenho apresentado à fadiga.
- Efectuar um maior número de ensaios do mesmo tipo que os realizados no decorrer deste trabalho para obter mais pontos característicos da mistura e assim poder ter melhor representatividade da situação em análise para além de também estudar o comportamento à deformação permanente.
- Estudar o comportamento da mistura betuminosa tradicional da mesma composição que a mistura morna que se estude para poder melhor avaliar o desempenho desta.
- Estudar outro tipo de aplicações das misturas betuminosas mornas, como pode ser o uso para camadas de desgaste.
- Realizar trechos experimentais com misturas betuminosas mornas, com a finalidade de avaliar o desempenho em serviço deste tipo de misturas ao longo do seu ciclo de vida.

4.3. Considerações finais

Considera-se finalmente depois de todo o trabalho feito que vale a pena continuar o desenvolvimento das misturas betuminosas mornas pela sua contribuição para a conservação do ambiente e para um uso mais eficiente dos recursos a aplicar na conservação da rede rodoviária do país.

BIBLIOGRAFIA

Baptista, A.M. (2006). “*Misturas Betuminosas Recicladas a Quente em Central. Contribuição para o seu estudo e aplicação*”. Dissertação de Doutoramento, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra.

Baptista, A.M.; Picado-Santos, L.; Capitão, S. (2011). “*Design of Hot Mix Recycled Asphalt Concrete Produced in Plant without Preheating the Reclaimed Material*”. International Journal of Pavement Engineering, First published on: 13 June 2011 (iFirst), DOI: 10.1080/10298436.2011.587009, URL: <http://dx.doi.org/10.1080/10298436.2011.587009>.

Batista, F.; Antunes, M.L.; Fonseca, P. (2008) “*Avaliação da Sensibilidade à Água de Misturas Betuminosas com Betume Modificado com Alta Percentagem de Borracha*”. Estudo realizado no LNEC, Lisboa.

Betunel, Tecnologia em Asfaltos, 2010. “*Aditivos Asfálticos de Reciclagem para Misturas à Quente*”.

<http://www.betunel.com.br>, consultado em 18 de Abril de 2011.

Branco, F.; Picado Santos, L.; Pereira, P. (2008). “*Pavimentos Rodoviários*”. Coimbra, Portugal.

CEPSA, 2010. “*Vademecum de Pavimentación*”.

<http://www.cepsa.com>, consultado em 14 de Abril de 2011.

CRT, 2010. Bending Beam Testing.

<http://www.cooper.co.uk>, consultado em 6 de Abril de 2011.

Crucho, J. (2011). “*Contribuição para o Estudo da Resistência à Fadiga de Misturas Betuminosas com Incorporação de ASIC*”. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil do Instituto Superior Técnico, Lisboa.

Ecopetrol S.A., 2010. Ceras parafínicas.

<http://www.ecopetrol.com.co>, consultado em 7 de Abril de 2011.

EN 12697-6, 2003. “*Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt, Part 6: Determination of bulk density of bituminous specimens*”. European Committee for Standardization, Brussels.

EN 12697-24, 2004. “*Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt, Part 24: Resistance to fatigue*”. European Committee for Standardization, Brussels.

Gardete, D. (2006). “*Comparação de Ensaios Laboratoriais para a Caracterização de Misturas Betuminosas à Deformação Permanente*”. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra.

INIR (2011). “*Directivas para a Conceção de Pavimentos. Critérios de Dimensionamento*”. Documento de trabalho obtido em www.inir.pt. Instituto de Infra-Estruturas Rodoviárias IP, Lisboa.

JAE (1995) “*Manual de Conceção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional, MACOPAV*”. Junta Autónoma de Estradas, Lisboa.

Lima, A. F. (2003). “*Caracterização Mecânica de Misturas Asfálticas Recicladas a Quente*”. Dissertação de Mestrado, Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, Brazil, 99 fls.

Manrique, E. “*Tensoactivos y Auxiliares*”.
<http://www.artisam.org>, consultado em 5 de Abril de 2011.

Pérez, L.; Pérez, M.E. (2009). “*Mezclas Bituminosas Fabricadas a Baja Temperatura. Experiencia Española*”. XV Congreso Ibero-Latinoamericano do Asfalto, CILA, Lisboa, 689-698.

Picado-Santos, L.; Branco, F.; Capitão, S. (2000). “*Vias de Comunicação, Volume I*”. Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra.

Picado-Santos, L.; Baptista, A.M.; Capitão, S. (2010). “*Assessment of the Use of Hot-Mix Recycled Asphalt Concrete in Plant*”. ASCE - Journal of Transportation Engineering, Vol. 136, No. 12, pp. 1159-1164.

Shell (1990). “*The Shell Bitumen Handbook*”. Shell Bitumen U. K., Chertsey.

Silva, H.; Oliveira, J.; Ferreira, C. (2009). “*Avaliação do Desempenho de Misturas Betuminosas Temperadas*”. XV Congresso Ibero-Latinoamericano do Asfalto, CILA, Lisboa, 355-364.

Soto, J.A.; Barreno, I.; Siller, A. (2009). “*Sostenibilidad en Pavimentos de Carreteras. Mezclas a Baja Temperatura*”. XV Congreso Ibero-Latinoamericano do Asfalto, CILA, Lisboa, 619-628.

UNED, Universidad Nacional de Educación a Distancia, 2000. Grupo de las Zeolitas.
<http://www.uned.es>, consultado em 7 de Abril de 2011.