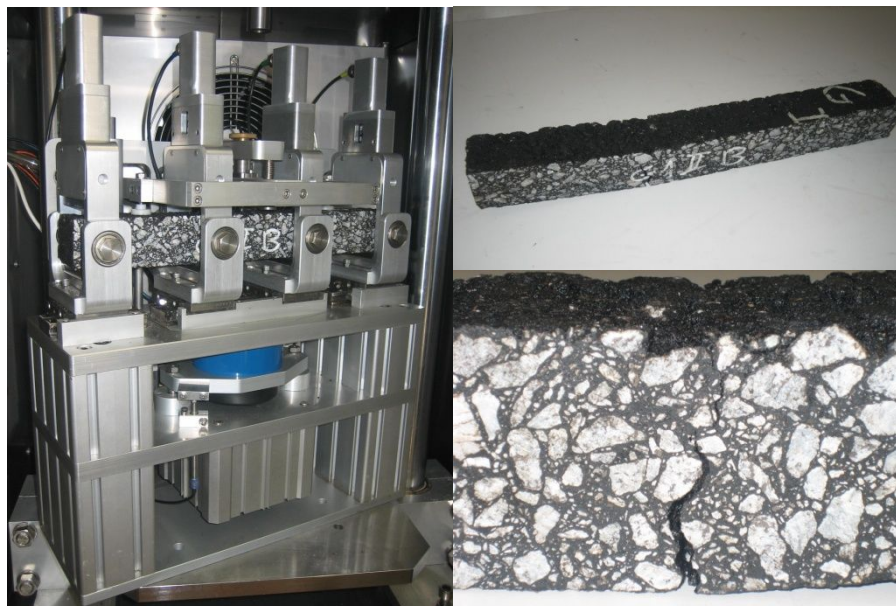




ISEL

INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA
Departamento de Engenharia Civil



Influência do envelhecimento na resistência à fadiga de misturas betuminosas

JOÃO PAULO TRABUCO DIAS
(Bacharel em Engenharia Civil)

Trabalho Final de Mestrado para obtenção do grau de Mestre
em Engenharia Civil na área de especialização de Vias de Comunicação e Transportes

Orientadores:

Fátima Alexandra Barata Antunes Batista, Doutora em Engenharia Civil
Maria da Graça Dias Alfaro Lopes, Doutora em Engenharia Civil

Juri:

Presidente:

Maria Helena Marecos, Doutora em Engenharia Civil

Vogais:

José Manuel Coelho das Neves, Doutor em Engenharia Civil
Fátima Alexandra Barata Antunes Batista, Doutora em Engenharia Civil
Maria da Graça Dias Alfaro Lopes, Doutora em Engenharia Civil

Outubro de 2009

*Aos meus pais, Lurdes e José
e à minha namorada Cátia*

INFLUÊNCIA DO ENVELHECIMENTO NA RESISTÊNCIA À FADIGA DE MISTURAS BETUMINOSAS

Nome: João Paulo Trabuco Dias

Curso de Mestrado em Engenharia Civil na área de especialização de Vias de
Comunicação e Transportes

Orientadores: Fátima Alexandra Barata Antunes Batista

Maria da Graça Dias Alfaro Lopes

RESUMO

A dissertação apresentada tem como objectivo principal avaliar a influência do envelhecimento na resistência à fadiga de misturas betuminosas.

O comportamento à fadiga das misturas betuminosas foi avaliado através da realização do ensaio de flexão em quatro pontos de acordo com os procedimentos de ensaio baseados na norma EN 12697-24.

Neste estudo foram fabricadas em laboratório duas misturas betuminosas tradicionais densas com agregados graníticos, diferindo apenas no tipo de betume, sendo uma composta por betume de pavimentação 35/50 e outra por betume 50/70.

O estudo do efeito do envelhecimento foi realizado após submeter os provetes de ensaio a envelhecimento simulado em laboratório, através da comparação dos resultados de resistência à fadiga, entre os provetes envelhecidos e não envelhecidos.

A partir dos resultados obtidos, concluiu-se que as misturas betuminosas envolvidas neste estudo apresentaram um comportamento à fadiga bastante satisfatório. Além disso, ambas as misturas apresentaram baixa sensibilidade ao envelhecimento e um comportamento à fadiga semelhante para as misturas envelhecidas e não envelhecidas.

PALAVRAS-CHAVE

Pavimentos rodoviários

Misturas betuminosas

Fadiga

Ensaio de Flexão

Envelhecimento

AGING INFLUENCE IN FATIGUE RESISTANCE OF BITUMINOUS MIXTURES

ABSTRACT

The main objective of this study was to evaluate the influence of aging in fatigue resistance of bituminous mixtures.

The fatigue behaviour of bituminous mixtures was evaluated by performing four point bending tests according to test procedures based on the standard EN 12697-24.

For this study two traditional dense bituminous mixtures with granitic aggregates were produced in laboratory, one with a 35/50 penetration grade bitumen and other with a 50/70 bitumen.

The assessment of the effect of aging was performed after submitting the test specimens to laboratory simulated aging, comparing the fatigue resistance results between aged and not aged beams.

From the obtained results, it was possible to conclude that the bituminous mixtures involved in this study presented a quite satisfactory fatigue behaviour. Besides, both mixtures showed low sensitivity to aging and a similar fatigue behaviour for the aged and not aged specimens.

KEY-WORDS

Road Pavements

Bituminous mixtures

Fatigue

Bending tests

Aging

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar o meu reconhecimento e os sinceros agradecimentos ao LNEC, pela disponibilização de meios e recursos, sem os quais não seria possível a realização deste trabalho.

Gostaria igualmente de expressar os meus sinceros agradecimentos:

À minha orientadora, Investigadora Auxiliar no LNEC, Doutora Fátima Batista, por todo o apoio, motivação, conselhos, dedicação e revisão do texto, bem como pela confiança em mim depositada para a realização deste trabalho.

À minha co-orientadora, Professora Coordenadora no ISEL, Doutora Maria da Graça Alfaro Lopes, pelos mesmos motivos referidos, pois foi igualmente transmissora de sabedoria e motivação desde o início da escolha deste tema.

À Investigadora Principal no LNEC, Doutora Maria de Lurdes Antunes, Chefe do Núcleo de Infra-estruturas Rodoviárias e Aeroportuárias (NIRA) do Departamento de Transportes do LNEC, pela disponibilização de meios e recursos, fundamentais para a realização deste trabalho.

A toda a equipa e experimentadores do NIRA, em particular, ao Carlos Pimentel, Eduardo Coimbra, José Reimão e Nuno Nunes, com quem trabalhei directamente, por toda a disponibilidade demonstrada e conselhos úteis e fundamentais durante a realização dos ensaios.

A todos os professores do Mestrado em Engenharia Civil do ISEL, da Área de especialização de Vias de Comunicação e Transportes, em particular, ao Eng.º Henrique Miranda, por me mostrar o mundo da pavimentação rodoviária e fazer despertar a minha sensibilidade para esta temática.

Por último, mas obviamente não menos importantes, gostaria de expressar os meus sinceros agradecimentos:

Aos meus pais, José e Lurdes, por todo o apoio nos momentos em que mais precisei, pela motivação, carinho e amizade demonstrados ao longo dos anos de curso e na realização deste trabalho.

À Cátia Alegrias, pela ajuda, motivação, compreensão, paciência e fundamentalmente amor que sempre me foi transmitido, principalmente nos momentos em que mais precisei e que não estive presente.

A toda a minha família e amigos, pelo apoio demonstrado, e pelos mais pequenos gestos e simples palavras, muitas vezes transmitidas e que fortemente me motivaram ao longo do curso e principalmente durante a realização deste trabalho.

INFLUÊNCIA DO ENVELHECIMENTO NA RESISTÊNCIA À FADIGA DE MISTURAS BETUMINOSAS

ÍNDICE

1. Introdução	1
1.1. Enquadramento do Tema.....	1
1.2. Objectivos e Metodologia	2
1.3. Estrutura do Trabalho.....	3
2. Comportamento de Misturas Betuminosas	5
2.1. Considerações Iniciais.....	5
2.2. Mecanismos de Degradação dos Pavimentos	6
2.3. Resistência à Fadiga de Misturas Betuminosas.....	13
2.3.1. Fendilhamento por Fadiga	14
2.3.2. Factores que afectam a Resistência à Fadiga.....	15
2.4. Envelhecimento de Misturas Betuminosas.....	16
2.4.1. Envelhecimento do Betume	17
2.4.2. Factores que Influenciam o Envelhecimento	20
2.5. Considerações Finais	22
3. Métodos de Caracterização em Laboratório das Misturas Betuminosas ...	25
3.1. Ensaios de Laboratório para Caracterização da Resistência à Fadiga	25
3.1.1. Considerações Iniciais	25
3.1.2. Métodos e Procedimentos de Ensaio	26
3.1.3. Ensaio de Flexão em Quatro Pontos	28
3.2. Envelhecimento Simulado em Laboratório	31
3.2.1. Generalidades.....	31
3.2.2. Método <i>Long-term Oven Aging</i> (LTOA)	32
3.3. Considerações Finais	33
4. Estudo Experimental para Avaliação da Influência do Envelhecimento na Resistência à Fadiga de Misturas Betuminosas	35
4.1. Considerações Iniciais.....	35
4.2. Caracterização dos Materiais Utilizados no Estudo Experimental.....	35
4.2.1. Agregados	36
4.2.2. Betume	37
4.3. Fabrico dos Provetes de Ensaio.....	42
4.4. Determinação do Módulo de Rigidez.....	44

4.5. Avaliação do Comportamento à Fadiga das Misturas Betuminosas.....	47
4.5.1 Apresentação e Análise de Resultados.....	48
5. Conclusões e Trabalhos Futuros.....	57
5.1 Conclusões.....	57
5.2 Trabalhos Futuros.....	55
Referências Bibliográficas	61

INFLUÊNCIA DO ENVELHECIMENTO NA RESISTÊNCIA À FADIGA DE MISTURAS BETUMINOSAS

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Principais tipos de degradação observados em pavimentos flexíveis pertencentes a redes principais	6
Figura 2.2 – Resposta de um pavimento flexível sujeito a uma carga uniforme “P”	9
Figura 2.3 – Zonas de tracção e compressão horizontal de um pavimento rodoviário sujeito à passagem de um rodado de um veículo	10
Figura 2.4 – Evolução do fendilhamento por fadiga	15
Figura 2.5 – Variação do envelhecimento do betume ao longo do tempo	18
Figura 2.6 – Variação do envelhecimento do betume e alteração dos seus componentes ao longo do tempo	20
Figura 3.1 – (a) Câmara para realização do ensaio de flexão em quatro pontos do LNEC; (b) Pormenor do equipamento.....	29
Figura 3.2 – Dimensões genéricas dos provetes utilizados no ensaio de flexão em quatro pontos.....	30
Figura 3.3 – Envelhecimento dos provetes em estufa.....	32
Figura 4.1 – Curva granulométrica da mistura de agregados utilizada nas misturas betuminosas	37
Figura 4.2 – Processo de recuperação do betume (separação dos agregados)	38
Figura 4.3 – Equipamento utilizado no processo de destilação (<i>Rotary Evaporator</i>) e cápsula com o betume recuperado	38
Figura 4.4 – Penetrómetro utilizado no ensaio.....	39
Figura 4.5 – Representação esquemática do ensaio de penetração.....	39
Figura 4.6 – Proвете de ensaio do método do anel e bola	41
Figura 4.7 – Determinação do ponto de amolecimento de um betume pelo método do anel e bola.....	41
Figura 4.8 – Processo de fabrico das misturas betuminosas	42
Figura 4.9 – Equipamento <i>Roller Compactor</i> utilizado para compactação dos provetes prismáticos.....	43
Figura 4.10 – Laje moldada e provetes de ensaio	43
Figura 4.11 – Evolução do módulo de rigidez com a frequência de ensaio da mistura BB1 e BB1-ENV	45
Figura 4.12 – Evolução do módulo de rigidez com a frequência de ensaio da mistura BB2 e BB2-ENV	46
Figura 4.13 – Leis de fadiga da mistura BB1 envelhecida e não envelhecida	49
Figura 4.14 – Leis de fadiga da mistura BB2 envelhecida e não envelhecida	49
Figura 4.15 – Leis de fadiga das misturas G1 e G2 envelhecidas e não envelhecidas	50

INFLUÊNCIA DO ENVELHECIMENTO NA RESISTÊNCIA À FADIGA DE MISTURAS BETUMINOSAS

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 – Factores que influenciam a resistência à fadiga de misturas betuminosas..	16
Quadro 2.2 – Factores que afectam as propriedades do betume antes da construção de um pavimento	22
Quadro 3.1 – Comparação das variáveis para ensaios realizados a tensão controlada e a extensão controlada.....	27
Quadro 3.2 – Ensaio de avaliação da resistência à fadiga descritos na norma EN 12697-24.....	28
Quadro 4.1 – Misturas betuminosas utilizadas no estudo	35
Quadro 4.2 – Composição das misturas betuminosas	36
Quadro 4.3 – Características dos agregados utilizados nas misturas betuminosas	36
Quadro 4.4 – Resultados dos ensaios para determinação da penetração dos betumes recuperados.....	40
Quadro 4.5 – Resultados do ensaio da temperatura de amolecimento pelo método do anel e bola.....	41
Quadro 4.6 – Composição volumétrica das misturas	44
Quadro 4.7 – Resultados complementares de resistência à fadiga, para ambas as misturas, envelhecidas e não envelhecidas	50

INFLUÊNCIA DO ENVELHECIMENTO NA RESISTÊNCIA À FADIGA DE MISTURAS BETUMINOSAS

LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

SÍMBOLOS

Alfabeto Latino

Símbolo	Significado
a	Constante, parâmetro característico dos materiais
b	Constante, parâmetro característico dos materiais
B	Largura do provete de ensaio
c	Constante, parâmetro característico dos materiais
d	Constante, parâmetro característico dos materiais
D	Dimensão máxima do agregado
E	Módulo de rigidez
H	Altura do provete de ensaio
K	Constante
L	Comprimento efectivo do provete de ensaio
L_{tot}	Comprimento total do provete de ensaio
N	Número de aplicações de carga
N_{adm}	Número admissível de passagens de eixos padrão
p	Inclinação da lei de fadiga
P	Carga uniforme aplicada devido à passagem do rodado de um veículo
Pen	Penetração do betume
S_{mist}	Módulo de rigidez da mistura betuminosa
T_{AB}	Temperatura de amolecimento de anel e bola do betume
V_b	Percentagem volumétrica de betume

Alfabeto Grego

Símbolo	Significado
ϵ	Extensão
ϵ^6	Extensão imposta para se obter um milhão de ciclos de carregamento
ϵ_t	Extensão horizontal de tracção
ϵ_t^b	Valor máximo da extensão de tracção induzida pelo eixo padrão

ϵ_z	Extensão vertical de compressão
η_o	Viscosidade inicial
η_f	Viscosidade final
σ	Tensão
σ_z	Tensão vertical de compressão

Funções matemáticas

Símbolo	Significado
----------------	--------------------

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

SIGLAS

Sigla	Significado
--------------	--------------------

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ASTM	American Society for Testing and Materials
CE	Comissão Europeia; Caderno de Encargos
CEN	Comité Européen de Normalização
COST	European Cooperation in the field of Scientific and Technical Research
DT	Departamento de Transportes
EN	Norma Europeia
EP	Estradas de Portugal
FHWA	Federal Highway Administration
ISEL	Instituto Superior de Engenharia de Lisboa
JAE	Junta Autónoma de Estradas (actual EP)
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
LTOA	Long-Term Oven Aging
LVDT	Linear Variable Differential Transducer
NIRA	Núcleo de Infra-estruturas Rodoviárias e Aeroportuárias
NP EN	Norma Portuguesa traduzida de Norma Europeia
PAV	Pressure Aging Vessel
RTFOT	Rolling Thin Film Oven Test
SHRP	Strategic Highway Research Program
TFOT	Thin Film Oven Test
TRB	Transportation Research Board

1. INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO DO TEMA

Em Portugal, a rede rodoviária é constituída, em mais de 90%, por pavimentos flexíveis, tornando pertinente o estudo e aprofundamento do conhecimento das características e do comportamento das misturas betuminosas utilizadas neste tipo de pavimentos.

Os utentes das infra-estruturas de transporte e mais concretamente da rede rodoviária, 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 de utilidade pública, como neste caso, em infra-estruturas rodoviárias.

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

A utilização de camadas betuminosas com maior espessura, devido ao aumento constante do tráfego, concretamente de veículos pesados, a maior pressão de enchimento dos pneus devido à maior quantidade de carga transportada, a substituição de eixos duplos por simples, conseqüentemente, com maior carga por eixo e maiores tensões induzidas ao pavimento, são factores que, aliados às condições climatéricas, proporcionam um fenómeno de fendilhamento por fadiga com origem na superfície da camada de desgaste (Antunes, 2005; Freitas, 2004).

O fenómeno do fendilhamento por fadiga com origem na superfície das camadas de desgaste em misturas betuminosas é assinalado no estudo europeu COST 333 (1999), como um dos principais mecanismos de degradação de pavimentos flexíveis, observado em países europeus, pretendendo-se no presente trabalho aprofundar os conhecimentos no que respeita a esta temática.

Para o efeito, será tido em consideração o envelhecimento das misturas betuminosas, uma vez que este é um factor determinante na evolução do seu comportamento ao longo do tempo, especialmente das aplicadas em camadas de desgaste.

Em relação aos métodos de ensaio para avaliação da resistência à fadiga, em Portugal foi durante muito tempo utilizada a norma americana AASHTO TP8-94. Com o aparecimento das normas europeias, em particular, da EN 12697-24, relativa à resistência à fadiga, torna-se necessário desenvolver estudos de forma a se obterem novos valores de referência para o comportamento à fadiga de misturas, avaliado segundo esta norma. Neste âmbito, o estudo desenvolvido por Miranda (2007), contempla a utilização da nova norma europeia para misturas com betume modificado com borracha, efectuando a comparação de resultados com a aplicação da norma americana referida.

A nível nacional foram igualmente desenvolvidos vários estudos, como por exemplo, pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (Batista *et al.*, 2006), pela Universidade do Minho (Sousa *et al.*, 1999) e ainda por Miranda (2007), para o aprofundamento do conhecimento sobre a influência do envelhecimento na resistência à fadiga em misturas betuminosas, em particular, para o caso de misturas com betume modificado com borracha.

Neste contexto, considerou-se oportuno desenvolver neste trabalho o estudo do comportamento à fadiga de misturas betuminosas tradicionais habitualmente utilizadas no nosso País, utilizando a norma EN 12697-24, bem como avaliar a influência do envelhecimento das misturas na resistência à fadiga.

1.2. OBJECTIVOS E METODOLOGIA

Este estudo tem como objectivos principais aprofundar os conhecimentos acerca da resistência à fadiga de misturas betuminosas tradicionais, através da aplicação da norma EN 12697-24 e avaliar a influência do envelhecimento. Pretende-se igualmente efectuar a comparação dos resultados que serão obtidos, com estudos anteriormente realizados para diferentes misturas betuminosas.

Para a concretização destes objectivos, o trabalho é constituído por duas fases, que consistem em:

- pesquisa bibliográfica, de forma a aprofundar e sintetizar conhecimentos e estudos realizados sobre a resistência à fadiga de misturas betuminosas, com abordagem ao tema do fendilhamento com origem à superfície e ainda sobre o envelhecimento das misturas betuminosas;
- estudo laboratorial para avaliação do comportamento à fadiga de misturas betuminosas e para avaliação da influência do envelhecimento.

1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está dividido em cinco capítulos descritos em seguida:

Capítulo 1: *“Introdução”*. No primeiro capítulo faz-se uma introdução e enquadramento do tema que se aborda neste estudo, descrevendo os seus objectivos e a estrutura do trabalho;

Capítulo 2: *“Comportamento de misturas betuminosas”*. Neste capítulo é apresentado o estudo efectuado sobre o comportamento de misturas betuminosas, com abordagem ao tema do fendilhamento por fadiga, e ainda sobre o envelhecimento das misturas betuminosas e a sua influência no comportamento referido;

Capítulo 3: *“Métodos de caracterização em laboratório das misturas betuminosas”*. Neste capítulo é feita uma abordagem aos principais métodos utilizados em laboratório para caracterização da resistência à fadiga de misturas betuminosas e descrição do ensaio utilizado neste estudo, bem como dos procedimentos para simulação do envelhecimento em laboratório;

Capítulo 4: *“Estudo experimental para avaliação da influência do envelhecimento na resistência à fadiga de misturas betuminosas”*. Neste capítulo é feita uma descrição dos materiais e misturas utilizadas neste estudo, da metodologia utilizada nos ensaios laboratoriais para avaliação da resistência à fadiga e para

simulação do envelhecimento das misturas betuminosas, efectuando-se a apresentação e discussão dos resultados obtidos no estudo experimental;

Capítulo 5: “*Conclusões e trabalhos futuros*”. No último capítulo apresentam-se as principais conclusões retiradas do estudo efectuado, no que diz respeito à avaliação da influência do envelhecimento na resistência à fadiga das misturas betuminosas utilizadas e referem-se as linhas de orientação para trabalhos futuros.

2. COMPORTAMENTO DE MISTURAS BETUMINOSAS

2.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O estado dos pavimentos, as suas características e o seu comportamento mecânico evoluem ao longo do tempo, principalmente devido à acção do tráfego e dos agentes climáticos.

A exposição do pavimento à acção dos agentes climáticos, principalmente das camadas superficiais, provoca ao longo do tempo, degradações no pavimento, devido ao envelhecimento sofrido pela mistura betuminosa, principalmente do betume. De facto, o betume endurece com o passar do tempo, tornando-se mais rígido e mais susceptível a sofrer fendilhamento (Glover *et al.*, 2005). É igualmente perceptível que o envelhecimento do betume sofrido com o passar do tempo favoreça a perda de adesividade na ligação agregados/betume (Antunes, 2005).

A passagem repetida de veículos, principalmente pesados, provoca vários tipos de alterações nos pavimentos, quer a nível superficial, favorecendo a desagregação dos materiais e a perda de aderência da camada de desgaste, quer a nível estrutural, favorecendo degradações induzidas pelo estado de tensões e extensões a que a estrutura do pavimento está sujeita.

Os mecanismos de degradação habitualmente verificados e que são utilizados como modelos para dimensionamento de pavimentos flexíveis, correspondem ao fendilhamento por fadiga na base das camadas betuminosas e à deformação permanente no solo de fundação.

Neste capítulo será efectuada um estudo sobre o comportamento de misturas betuminosas, mais concretamente no que respeita à resistência à fadiga, ao envelhecimento e à sua influência no comportamento das misturas.

2.2. MECANISMOS DE DEGRADAÇÃO DOS PAVIMENTOS

No âmbito da acção COST 333 (1999), que incluiu observações de pavimentos flexíveis nos 22 Países Europeus intervenientes neste projecto, incluindo Portugal, foram identificados os principais tipos de degradação de pavimentos flexíveis habitualmente observados nesses Países, conforme ilustrado na Figura 2.1.

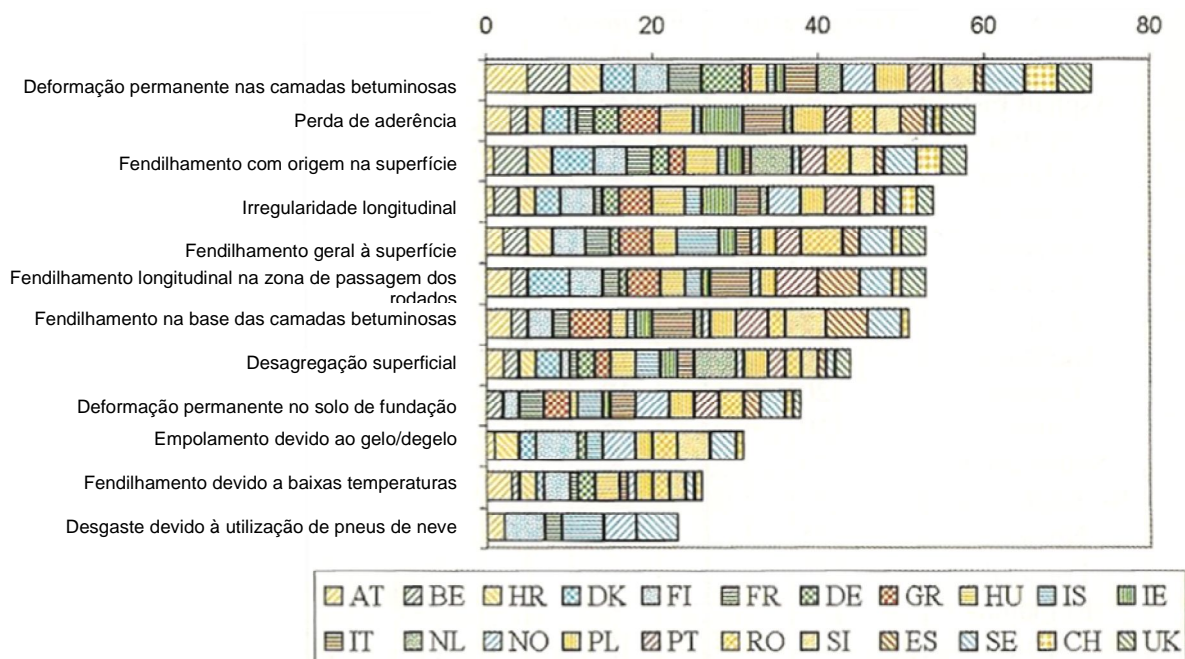


Figura 2.1 – Principais tipos de degradação observados em pavimentos flexíveis pertencentes a redes principais (adaptado de COST 333, 1999, citado em Antunes, 2005)

Uma das conclusões retiradas das observações decorrentes da acção COST 333 foi que, actualmente os mecanismos de degradação estruturais mais frequentes nos pavimentos rodoviários em serviço de países europeus, não são os habitualmente considerados condicionantes no dimensionamento de pavimentos flexíveis (deformação permanente do solo de fundação e fendilhamento por fadiga na base das camadas betuminosas). Como se pode observar na Figura 2.1, a deformação permanente das camadas betuminosas e o fendilhamento com origem à superfície, são os mecanismos de degradação estruturais que ocorrem com maior frequência.

Conforme referido anteriormente, entre os principais factores que conduzem ao fendilhamento com origem à superfície, encontram-se o constante aumento do

tráfego de veículos pesados, a elevada pressão de enchimento dos pneus, a substituição de eixos duplos por simples, com o conseqüente aumento das cargas por eixo e as maiores espessuras utilizadas nas camadas betuminosas (Antunes, 2005; Freitas, 2004).

Segundo um estudo efectuado pelo *Proyecto Fénix* (2008), o fenómeno do fendilhamento com origem à superfície tem como causa provável de ocorrência, o efeito conjunto dos esforços superficiais devidos à acção do tráfego e das tensões provocadas pelas amplitudes térmicas. Os efeitos das acções do tráfego podem ser mais significativos quando a temperatura do pavimento baixa rapidamente, por exemplo, devido a um ciclo dia/noite ou a aguaceiros em tempo quente. Nestes casos, a superfície da camada de desgaste fica mais rígida do que o conjunto da mistura a maiores profundidades, surgindo tensões diferenciadas, potenciando o aparecimento do fendilhamento superficial.

Este fenómeno é ainda acentuado devido ao envelhecimento da mistura na superfície, que está em contacto permanente com os agentes atmosféricos, mais concretamente, a luz solar e o oxigénio, o que provoca o aumento da rigidez, tornando a mistura mais frágil e susceptível ao fendilhamento com origem à superfície (*Proyecto Fenix*, 2008).

Segundo o estudo referido, a diminuição da resistência à tracção e a excessiva rigidez da mistura, que originam este fenómeno, podem ser potenciadas pelos seguintes factores:

- Segregação dos agregados;
- Baixo teor de betume;
- Volume de vazios elevado;
- Baixas temperaturas de serviço (dependendo do tipo de betume);
- Envelhecimento do betume.

A segregação superficial do pavimento é um fenómeno originado pelos factores ambientais e de tráfego referidos, mas também por aspectos relacionados com a composição da mistura, por exemplo, a acumulação de agregados de maiores dimensões junto da superfície, o volume de vazios da mistura, a quantidade de betume e a granulometria dos agregados (Anderson *et al.*, 2001). Verifica-se que,

se a mistura tiver maior percentagem de finos, tem menor tendência a fendilhar, devido à menor segregação superficial do material (Harmelink *et al.*, 2008).

O baixo teor de betume irá provocar um aumento da rigidez da mistura, tornando-a mais susceptível a sofrer fendilhamento, visto que diminuem as propriedades visco-elásticas da mistura betuminosa, o que provoca igualmente a segregação dos agregados devido ao menor envolvimento das partículas pelo betume.

O volume de vazios elevado provoca uma diminuição da capacidade estrutural da mistura, visto que, existem maiores espaços entre as partículas sem estarem preenchidos pelo betume, podendo provocar da mesma forma, uma diminuição da resistência à fadiga e potenciando a segregação superficial dos agregados.

As baixas temperaturas de serviço provocam o endurecimento da mistura, tornando-a mais susceptível ao fendilhamento. Este facto deve-se igualmente à diminuição das propriedades visco-elásticas da mistura, originadas pelo aumento de rigidez do betume. É importante referir que a utilização de betumes com menor viscosidade pode atenuar este facto.

O envelhecimento do betume ocorre durante o processo de fabrico, aplicação e ao longo da vida de serviço do pavimento. O endurecimento sofrido provoca um aumento de rigidez da mistura, tornando-a mais frágil e potenciando desta forma o seu fendilhamento. Este tema será posteriormente alvo de uma abordagem mais profunda.

Como referido anteriormente, outro factor que influencia a acção do tráfego de veículos pesados é o aumento da pressão de enchimento dos pneus, para fazer face ao aumento da carga transportada. Este facto provoca uma maior concentração de tensões nos bordos laterais dos pneus, que irá acentuar o aumento de tensões nas zonas laterais dos rodados dos veículos, surgindo desta forma o fendilhamento com origem à superfície longitudinalmente no pavimento (Baladi *et al.*, 2003).

O fenómeno do fendilhamento com origem à superfície tem origem, sobretudo, em pavimentos sujeitos a volumes de tráfego de veículos pesados muito elevados e portanto, em estruturas de pavimentos flexíveis com maiores espessuras de

camadas betuminosas, de forma a dar resposta às elevadas solicitações referidas. Tratam-se portanto de pavimentos com grande capacidade estrutural, que evitam o aparecimento dos mecanismos tradicionais de degradação utilizados no seu dimensionamento e que, com manutenção adequada poderão dar resposta eficaz à problemática referida, aumentando assim o seu tempo de serviço nas melhores condições de conforto e segurança para os utilizadores.

Desta forma, segundo Emery (2006), as principais soluções para evitar o fendilhamento com origem à superfície, são:

- Maior controlo dos limites de carga dos veículos pesados, da pressão de enchimento dos pneus e distribuição mais uniforme dos eixos;
- Apostar na manutenção e reabilitação dos pavimentos, evitando a propagação do fendilhamento.

Através da observação da Figura 2.2, que exemplifica a resposta de um pavimento flexível quando sujeito a uma carga uniforme “P”, simulando a passagem de um rodado de um veículo, verifica-se que estão representados os estados de tensão e deformação que levam ao aparecimento dos tipos de degradação referidos anteriormente. O fendilhamento com origem à superfície deve-se à existência de um estado de tensões e extensões horizontais de tracção na superfície da camada de desgaste (Figuras 2.2 e 2.3).

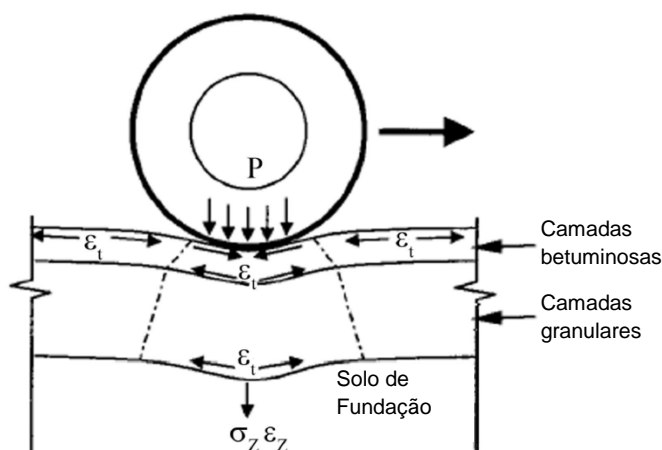


Figura 2.2 – Resposta de um pavimento flexível sujeito a uma carga uniforme “P”
(adaptado de Owende *et al.*, 2001)

Como se pode observar, nesta situação, ocorre um estado de tensões e extensões horizontais de tracção na base das camadas betuminosas, que origina o fendilhamento por fadiga neste local. Ocorre também um estado de tensões e extensões verticais de compressão na superfície do solo de fundação, que origina a sua deformação permanente.

Como complemento, de acordo com um estudo efectuado por Castell *et al.* (2000), apresenta-se a Figura 2.3, na qual se pode observar a importância das tensões de tracção horizontais verificadas não só sob os rodados dos veículos, mas também na zona lateral, o que potencia o fendilhamento com origem à superfície.

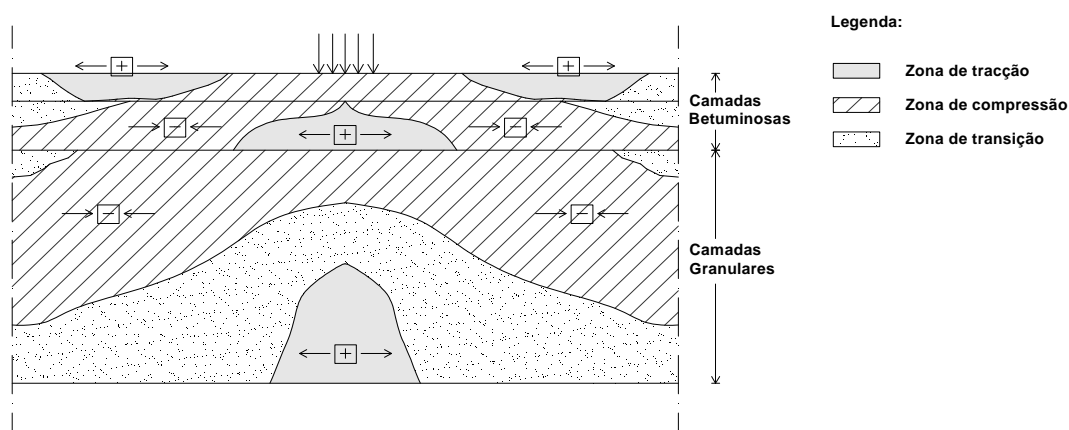


Figura 2.3 – Zonas de tracção e compressão horizontal de um pavimento rodoviário sujeito à passagem de um rodado de um veículo (adaptado de Castell *et al.*, 2000)

Os mecanismos de degradação de pavimentos são influenciados directamente pelos agentes climáticos, pelas características dos materiais utilizados na estrutura do pavimento e sobretudo pela acção repetida das cargas devidas ao tráfego, ou seja, pelo número acumulado de eixos padrão que solicitam o pavimento.

É com base neste pressuposto que, de um modo geral, as expressões utilizadas como modelos de degradação para o dimensionamento de pavimentos flexíveis no que respeita ao fendilhamento por fadiga e à deformação permanente são relações do seguinte tipo:

$$\varepsilon = a N^b \quad (2.1)$$

OU

$$\sigma = c N^d \quad (2.2)$$

em que:

ε – valor da extensão vertical de compressão na face superior do solo de fundação, no caso do critério das deformações permanentes, ou o valor máximo da extensão de tracção nas camadas betuminosas, no caso do critério do fendilhamento por fadiga;

σ – valor da tensão vertical de compressão na face superior do solo de fundação, no caso do critério das deformações permanentes, ou o valor máximo da tensão horizontal de tracção nas camadas betuminosas, no caso do critério do fendilhamento por fadiga;

N – número de aplicações de carga;

a, b, c e d – parâmetros característicos dos materiais.

Como este trabalho tem por base o estudo do comportamento à fadiga de misturas betuminosas, é pertinente apresentar-se os diferentes modelos de degradação por fadiga propostos por diversas instituições, como indica o estudo COST 333 (1999). Outras propostas são referenciadas no estudo citado, contudo, apenas se apresentam, a título meramente exemplificativo, 3 modelos, que correspondem aos mais utilizados no dimensionamento de pavimentos flexíveis:

- *Shell:*

$$\varepsilon = (0,856 \times V_b + 1,08) \times S_{mista}^{-0,36} \times N^{-0,2} \quad (2.3)$$

em que:

V_b – percentagem volumétrica de betume;

S_{mista} – módulo de rigidez da mistura betuminosa (N/m^2);

N – número acumulado de eixos padrão.

• *University of Nottingham:*

$$\log(\epsilon_t) = \frac{14,39 \times \log(V_b) + 24,2 \times \log(T_{AB}^i) - K - \log N}{5,13 \times \log(V_b) + 8,63 \times \log(T_{AB}^i) - 15,8} \quad (2.4)$$

em que:

T_{AB}^i – temperatura de ponto de amolecimento de anel e bola do betume antes de aplicado na mistura;

V_b – percentagem volumétrica de betume;

K – 46,06 (para N provocando estado de “ruína”);

K – 46,82 (para N provocando estado “crítico”);

N – número acumulado de eixos padrão.

• *Ex-Junta Autónoma de Estradas (ex-JAE):*

$$N_{adm} = a \times \epsilon_t^b \quad (2.5)$$

em que:

N_{adm} – número admissível de passagens de eixos padrão;

ϵ_t^b – valor máximo da extensão de tracção induzida pelo eixo padrão;

a , b – constantes que dependem da composição e propriedades da mistura, admitindo-se que tomam os seguintes valores: $a = 3$ a $3,5 \times 10^{-3}$; $b = -0,2$

Apesar dos conhecimentos adquiridos com os inúmeros estudos realizados nas últimas décadas, no que respeita ao comportamento à fadiga de misturas betuminosas, e ao facto destes modelos terem sido estabelecidos com base na observação de trechos experimentais, a estimativa da resistência à fadiga de uma mistura betuminosa é um processo complexo. Isto deve-se aos diversos factores que contribuem para o desenvolvimento deste fenómeno e à sua difícil previsão ao longo do tempo, nomeadamente: o tráfego, as condições climáticas, a grande

diversidade de materiais possíveis de serem utilizados numa mistura, o fabrico e compactação da mistura.

2.3. RESISTÊNCIA À FADIGA DE MISTURAS BETUMINOSAS

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

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

O fendilhamento devido a variações térmicas surge devido às amplitudes de temperatura que podem ocorrer nos ciclos dia/noite, em locais onde se verificam grandes variações diárias de temperatura e ainda em locais em que as temperaturas são normalmente baixas, levando desta forma ao endurecimento da mistura, tornando-a mais susceptível ao aparecimento de fendas.

O fendilhamento por reflexão de fendas é normalmente observado em pavimentos semi-rígidos, devido às variações de tensões verificadas nas camadas subjacentes com ligantes hidráulicos, que podem dever-se a variações de temperatura. O seu aparecimento é também usual em pavimentos flexíveis sujeitos a intervenções de reforço, onde foi colocada uma camada betuminosa sobre outra que se encontrava fendilhada, devendo-se este facto ao diferente comportamento das duas camadas quando sujeitas às acções do tráfego (Miranda, 2007).

O fenómeno de fendilhamento por fadiga é alvo de uma abordagem mais profunda neste estudo, tal como se apresenta em seguida.

2.3.1. FENDILHAMENTO POR FADIGA

A fadiga de misturas betuminosas é um fenómeno que origina o seu fendilhamento, geralmente devido à acção repetida das cargas impostas pelo tráfego (Miranda, 2007).

As tensões horizontais de tracção na base das camadas betuminosas surgem devido à acção dos rodados dos veículos e ao facto das camadas granulares subjacentes terem módulos de deformabilidade inferiores (Antunes, 2005). Estas tensões, devidas à acção repetida das cargas do tráfego originam a microfissuração, reduzindo a rigidez da camada e originando a sua propagação até se atingir um estado de ruína do pavimento.

De acordo com o estudo COST 333 (1999), citado por Miranda (2007), o fenómeno do fendilhamento por fadiga é composto por três fases distintas, consoante a sua evolução no pavimento:

- **Fase de iniciação e progressão generalizada dos danos**, que leva ao desenvolvimento de micro-fendas com a espessura de um cabelo;
- **Fase de propagação estável das fendas**, na qual algumas das micro fendas se desenvolvem, formando as denominadas macro fendas;
- **Fase de propagação instável das fendas**, na qual estas se desenvolvem e evoluem, resultando no limite em desintegração e rotura, com a consequente ruína das camadas betuminosas.

Este fenómeno é um processo denominado de “galopante”, visto que à medida que as fases se vão verificando, existe uma aceleração da propagação das degradações e conseqüentemente um enfraquecimento progressivo da estrutura do pavimento. Isto deve-se à entrada de água pelas fendas existentes à superfície, que entre outros, potencia o fenómeno de bombeamento de finos, transformando o processo num acontecimento cíclico, em que uma degradação leva à outra e a velocidade de evolução de uma, aumenta a velocidade de evolução da outra.

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

A Figura 2.4 ilustra o processo de evolução do fendilhamento desde o seu aparecimento à superfície da camada de desgaste até à formação de ninhos.



Figura 2.4 – Evolução do fendilhamento por fadiga (www.pavementinteractive.org)

2.3.2. FACTORES QUE AFECTAM A RESISTÊNCIA À FADIGA

Segundo Tangella *et al.* (1990), os principais factores que influenciam a resistência à fadiga das misturas betuminosas, são os seguintes:

- Modo de carregamento (acções tráfego);
- Composição da mistura (tipo e quantidade de betume e tipo de agregados);
- Processo de compactação da mistura;
- Acções climáticas.

Segundo o mesmo autor, citado por Miranda (2007), estes factores podem ser divididos consoante as características da mistura betuminosa, as características

do carregamento e os factores ambientais, que afectam a sua rigidez e o seu comportamento, como se indica no Quadro 2.1.

Quadro 2.1 – Factores que influenciam a resistência à fadiga de misturas betuminosas (adaptado de Tangella *et al.*, 1990)

Mistura Betuminosa	Carregamento	Ambientais
Tipo de mistura Tipo e quantidade de betume Temperatura de fabrico Temperatura de compactação Método de compactação Porosidade Tipo, forma, granulometria e textura do agregado	Magnitude do carregamento Tipo de carregamento Frequência do carregamento História de tensões: carregamento simples ou composto Forma de carregamento: triangular, quadrado, etc.	Temperatura Pluviosidade

Seguidamente será efectuada uma abordagem mais profunda referente ao tema do envelhecimento das misturas betuminosas, dada a sua influência no comportamento à fadiga de misturas betuminosas.

2.4. ENVELHECIMENTO DE MISTURAS BETUMINOSAS

De acordo com Herrington (1999), a diminuição da resistência à fadiga, é em grande parte, dependente do grau de envelhecimento da mistura.

O envelhecimento pode ser definido como a alteração sofrida pelas misturas betuminosas, devido à sua exposição atmosférica, sujeitas à presença de oxigénio, que provoca nas misturas alterações nas suas propriedades, favorecendo a degradação dos pavimentos (Miranda, 2007).

O principal constituinte das misturas betuminosas é o betume que é uma substância aglutinante de cor escura, derivada do processo de destilação do petróleo, cuja composição varia segundo a origem e processo de refinação do crude (Miranda, 2007).

O betume é o constituinte da mistura que sofre as maiores alterações nas suas propriedades ao longo da vida útil de um pavimento, principalmente devido à exposição atmosférica. Contudo, os outros componentes da mistura também têm

influência no que respeita ao comportamento da mistura como um todo. Segundo Bell e Sosnovske (1994), os agregados têm um papel importante no envelhecimento da mistura.

O tipo de agregados e de betume utilizados numa mistura têm influência nas ligações entre os materiais e no grau de adesividade entre eles, o que irá alterar a forma de envelhecimento, pois quanto melhor a adesividade agregado/betume, menor será o envelhecimento da mistura. É igualmente perceptível, que o endurecimento sofrido pelo betume provoca a diminuição da coesão, potenciando deste modo, uma diminuição da resistência à fadiga e neste caso o fendilhamento das camadas betuminosas (Antunes, 2005).

A espessura das camadas betuminosas tem alguma influência no seu envelhecimento, dado que, conforme aumenta a espessura, aumenta a dificuldade de movimentação do oxigénio, diminuindo desta forma a oxidação do betume (processo que será explicado no ponto seguinte), sendo portanto perceptível que com o aumento da porosidade da mistura se verifique um aumento da oxidação, devido a uma maior permeabilidade ao ar e à água durante a vida de serviço do pavimento (Kim *et al.*, 1987; Bell *et al.*, 1991). É fundamental referir, que a presença da água na mistura facilita a separação do betume dos agregados, devido à acção do tráfego que aumenta a pressão nos poros saturados, favorecendo assim a segregação do material. Contudo, segundo Collop *et al.* (2007), a presença da água pode retardar o envelhecimento da mistura, devido ao facto do preenchimento dos vazios da mistura pela água dificultar o contacto directo com o oxigénio da atmosfera, retardando deste modo, o processo oxidativo do betume.

2.4.1. ENVELHECIMENTO DO BETUME

Conforme referido no ponto anterior, um dos factores que mais influencia o envelhecimento das misturas betuminosas é o envelhecimento do próprio betume constituinte, tornando-se pertinente uma abordagem neste estudo sobre este processo.

Segundo Tonial (2001), o envelhecimento do betume pode ser definido, como o processo de endurecimento que este sofre durante o seu fabrico, transporte, aplicação e ao longo da vida de serviço, responsável pelas alterações das suas características físicas, químicas e reológicas que causam um aumento da sua consistência.

Embora o fenómeno do envelhecimento do betume decorra ao longo da vida de serviço do pavimento, é durante o processo de fabrico e aplicação em obra que ocorre perto de 60% do envelhecimento total do betume, tal como se observa na Figura 2.5. Segundo Mirza e Witczak (1995), o envelhecimento pode ser dividido em duas fases: (1ª) Curto prazo, durante o processo de fabrico, aplicação e compactação da mistura; e (2ª) Longo prazo, durante o tempo de serviço do pavimento.

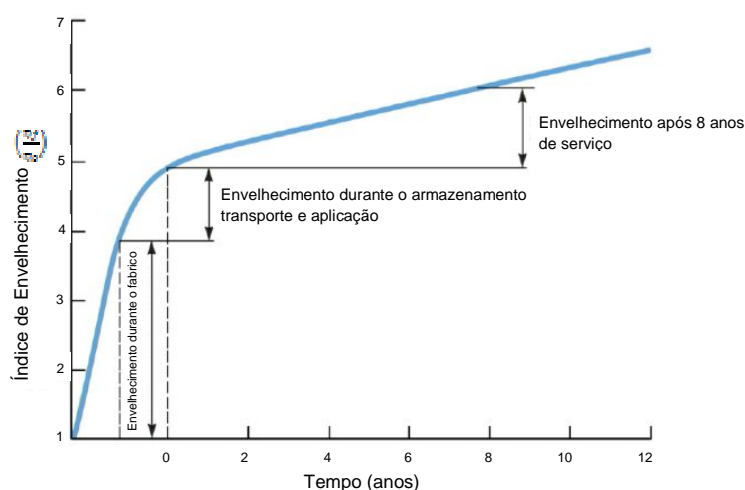


Figura 2.5 – Variação do envelhecimento do betume ao longo do tempo (adaptado de Shell, 2003)

A composição química do betume divide-se em asfaltenos e maltenos. Os asfaltenos constituem a fracção insolúvel, e os maltenos, que constituem a fracção solúvel, dividem-se em saturados, aromáticos e resinas e são os responsáveis pelo envelhecimento.

O envelhecimento do betume depende de diversos factores, contudo, segundo Roberts *et al.* (1996), os mais importantes são a oxidação e a volatilização dos componentes voláteis e aromáticos (maltenos).

A oxidação deve-se à reacção dos componentes do betume com o oxigénio da atmosfera e consiste na perda das características reológicas do betume, originada pela reacção do oxigénio com o hidrogénio existente no betume proporcionando a formação de água. A eliminação do hidrogénio incrementa a relação carbono/hidrogénio que origina o endurecimento do betume (aumento da viscosidade e rigidez) e a perda de ductilidade e adesividade agregados/betume (Pellinen *et al.*, 2008).

Segundo Mercado *et al.* (2005), a oxidação é directamente dependente da temperatura, que é o principal factor que contribui para o envelhecimento por oxidação. O betume, sendo um material termoplástico, torna-se mais rígido (mais viscoso) com a diminuição da temperatura e torna-se menos rígido (menos viscoso) com o aumento da temperatura, contudo, dois tipos de betumes diferentes podem ter a mesma rigidez e viscosidade a uma dada temperatura, mas apresentarem comportamentos diferentes com as variações térmicas (Pellinen *et al.*, 2008).

O processo de oxidação ocorre ao longo da vida útil do pavimento, visto que a mistura betuminosa está em contacto permanente com o oxigénio da atmosfera e por isso, é susceptível a sofrer alterações nas suas propriedades, contudo, é a curto prazo que ocorrem as maiores transformações.

A volatilização ocorre principalmente na fase inicial da vida do betume e consiste na perda dos maltenos por evaporação, o que provoca igualmente um aumento da viscosidade do betume reduzindo a sua absorção pelos agregados. Estes dois factores relacionados têm grande influência na rigidez do betume (Pellinen *et al.*, 2008).

As alterações na composição química do betume relacionadas com o seu envelhecimento, estão representadas na Figura 2.6. Como se verifica, o aumento da quantidade de asfaltenos provoca um aumento da viscosidade do betume. Desta análise, pode-se concluir que estes componentes são responsáveis por esta característica, aumentando a sua rigidez e diminuindo desta forma a sua flexibilidade, tornando conseqüentemente o pavimento mais susceptível ao

fendilhamento por fadiga (Glover *et al.*, 2005), devido à aplicação das cargas impostas pelos veículos (Ruan *et al.*, 2003).

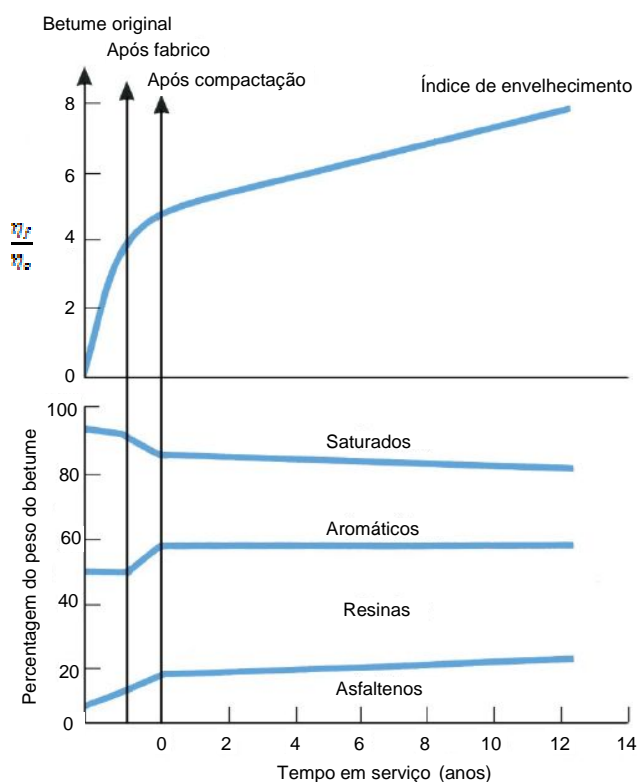


Figura 2.6 – Variação do envelhecimento do betume e alteração dos seus componentes ao longo do tempo (adaptado de Shell, 2003)

2.4.2. FACTORES QUE INFLUENCIAM O ENVELHECIMENTO

Referenciados no ponto anterior, os processos de oxidação e volatilização do betume são os principais factores de envelhecimento das misturas betuminosas e ocorrem na fase inicial da sua vida. Contudo, existem outros factores que contribuem igualmente para o desenvolvimento dos processos referidos, influenciando desta forma o envelhecimento das misturas betuminosas, no seu fabrico e durante a sua vida de serviço.

Segundo a Shell (1990), os principais factores que contribuem para o envelhecimento a longo prazo são: o teor de vazios da mistura, a espessura da película de betume que envolve os agregados (teor de betume), a absorção dos

agregados e a espessura das camadas betuminosas. Quanto a este último factor, refere-se que, naturalmente, a influência dos agentes climáticos, principalmente das radiações ultravioletas, torna-se menos significativa com a profundidade, uma vez que apenas são notáveis os seus efeitos nos primeiros milímetros da camada de desgaste, diferindo consoante o tipo de mistura (Martínez e Caicedo, 2005). Contudo, no que respeita ao fendilhamento com origem à superfície, este é um factor a considerar, visto que a superfície da camada de desgaste irá sofrer maior envelhecimento e portanto tenderá a ser menos resistente (para o mesmo nível de extensão) do que o restante conjunto da mistura a maiores profundidades.

Foi já referida a importância do envelhecimento em diversas fases da vida de um pavimento flexível, embora, este fenómeno ocorra desde o processo de fabrico da mistura e se prolongue ao longo da vida útil do pavimento. Desta forma, seguidamente será abordado o envelhecimento inicial do betume e os factores que influenciam o seu desenvolvimento.

O envelhecimento acelerado na fase de produção e construção tem grande influência nas propriedades do betume e no desempenho da mistura, no início da vida de serviço do pavimento, possivelmente devido às elevadas temperaturas e demasiado tempo de armazenamento (Leidy, 2001).

Segundo Mercado *et al.* (2005), os principais factores que afectam as propriedades do betume são: a presença ou utilização de modificadores, o período de armazenamento, a temperatura de armazenamento e o nível de contaminação do betume. Estes factores são claramente responsáveis pelo comportamento do betume em relação ao seu envelhecimento.

No Quadro 2.2 apresentam-se os factores que afectam as propriedades do betume antes da construção de um pavimento, considerando a sua importância e contributo para o envelhecimento do betume e conseqüentemente das misturas betuminosas.

Quadro 2.2 – Factores que afectam as propriedades do betume antes da construção de um pavimento (adaptado de Mercado *et al.*, 2005)

Localização do Betume	Factores que afectam as propriedades do betume
Extracção e fabrico	<ul style="list-style-type: none">- mudança do local de extracção do petróleo- processo de destilação- contaminação com betumes de diferentes tipos- tempo de armazenamento- temperatura de armazenamento (sobreaquecimento)
Linha de transferência e transporte	<ul style="list-style-type: none">- contaminação com betumes de diferentes tipos- temperatura de armazenamento (sobreaquecimento)
Local da obra ou fabrico da mistura	<ul style="list-style-type: none">- separação- diluição- utilização ou presença de modificadores- contaminação com betumes de diferentes tipos- tempo de armazenamento- temperatura de armazenamento (sobreaquecimento)

2.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os factores considerados como principais influentes para o desenvolvimento do fenómeno do fendilhamento por fadiga, quer na base das camadas betuminosas, quer com origem na superfície, são o tráfego e as condições climáticas, aliados ao envelhecimento das misturas betuminosas, que foi alvo de aprofundamento neste estudo, como tema fundamental e de enquadramento neste trabalho.

Além dos factores referidos, existem outros responsáveis e com contributo significativo para o aparecimento deste fenómeno. Salienta-se a granulometria e tipo de agregados, e a quantidade e tipo de betume (cujo comportamento depende das temperaturas de serviço verificadas, devido às suas características visco-elásticas).

O envelhecimento das misturas betuminosas pode alterar em maior ou menor grau a sua resistência à fadiga. O envelhecimento ocorre ao longo de toda a vida de serviço do pavimento, contudo, é a curto prazo, durante o processo de fabrico do betume, fabrico da mistura, aplicação em obra e compactação, que ocorre a maior parte deste processo, representando perto de 60% do total do envelhecimento sofrido ao longo da vida útil do pavimento.

Desta forma, é necessário um aprofundamento dos conhecimentos, processos de fabrico e construtivos, investindo em soluções que minimizem este fenómeno, na tentativa de obtenção de misturas mais homogéneas e de melhor comportamento ao longo da vida de serviço do pavimento, mas principalmente a curto prazo.

O processo de envelhecimento da mistura betuminosa, está obviamente relacionado com o envelhecimento do betume, pois é este o constituinte que sofre as maiores alterações nas suas propriedades. Contudo, é necessária uma abordagem da mistura como um todo, e considerar o contributo do tipo de agregados utilizados, de forma a perceber o processo e as alterações sofridas por diferentes tipos de misturas betuminosas, possíveis de ser utilizadas na estrutura de um pavimento flexível.

3. MÉTODOS DE CARACTERIZAÇÃO EM LABORATÓRIO DAS MISTURAS BETUMINOSAS

3.1. ENSAIOS DE LABORATÓRIO PARA CARACTERIZAÇÃO DA RESISTÊNCIA À FADIGA

3.1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo descrevem-se processos e métodos de ensaio em laboratório para caracterização do comportamento à fadiga de misturas betuminosas.

Existem vários métodos de ensaio para avaliação da resistência à fadiga de misturas betuminosas. Neste trabalho será feita uma descrição mais detalhada do ensaio de flexão em quatro pontos, uma vez que será este o método utilizado no estudo experimental.

A caracterização da resistência à fadiga é efectuada neste caso, tendo por base a norma europeia EN 12697-24, Anexo D, correspondente ao ensaio de flexão em quatro pontos. Esta norma não especifica uma temperatura de ensaio e frequência de carregamento concretas, possibilitando a utilização de uma diversa gama de frequências de ensaio.

São igualmente consideradas as normas europeias EN 13108, que estabelecem as condições de ensaio e normalizam o fabrico de misturas betuminosas a nível europeu, permitindo a sua marcação CE, e com isto, a sua livre circulação no espaço europeu. A parte 20 da referida norma, diz respeito aos ensaios utilizados na certificação de misturas betuminosas.

É importante salientar, que a norma EN 13108-20 especifica para o ensaio de flexão em quatro pontos, uma temperatura de 20 °C e frequência de carregamento de 30 Hz. Por esta razão, no presente trabalho, adoptaram-se estas condições de ensaio no estudo experimental realizado.

3.1.2. MÉTODOS E PROCEDIMENTOS DE ENSAIO

A caracterização do comportamento à fadiga de misturas betuminosas é feita normalmente por meio de ensaios de simulação e ensaios de laboratório.

Os ensaios de simulação correspondem a ensaios de simulação em pista (à escala real ou reduzida), e pretendem, como o nome indica, 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, utilizado 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. A resistência à fadiga da mistura betuminosa, é representada pelo número de aplicações de carga até o provete atingir a rotura.

Os ensaios laboratoriais para caracterização da resistência à fadiga podem diferir consoante o modo de aplicação da carga, dividindo-se em ensaios realizados a tensão controlada ou a extensão controlada.

Nos ensaios realizados a tensão controlada, a carga aplicada ao provete 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 de geralmente uma fenda. Este tipo de ensaio é normalmente 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 fendas, que geralmente surgem como micro fendas não visíveis. Este tipo de ensaio é normalmente utilizado na avaliação de camadas betuminosas de pouca espessura ao contrário dos ensaios a tensão controlada.

Os critérios de rotura associados a cada tipo de ensaio também diferem. Nos ensaios a tensão controlada, o critério de rotura 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 deformabilidade em relação ao valor verificado inicialmente.

No Quadro 3.1 (Tangella *et al.*, 1990, citado por Miranda 2007), apresenta-se uma comparação dos ensaios efectuados a tensão controlada e a extensão controlada, em termos da evolução de variáveis analisadas na realização dos mesmos.

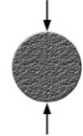


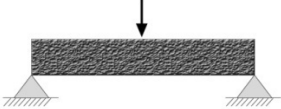
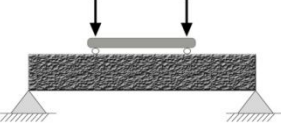
Quadro 3.1 – Comparação das variáveis para ensaios realizados a tensão controlada e a extensão controlada (adaptado de Tangella *et al.*, 1990)

Variáveis	Tensão controlada	Extensão controlada
Espessura das camadas betuminosas	Indicado para camadas betuminosas de maior espessura	Indicado para camadas betuminosas de menor espessura
Definição da rotura, nº de aplicações da carga	Bem definida, pois existe rotura do provete	Arbitrário, habitualmente adoptada a redução de 50% do módulo de rigidez
Dispersão de resultados	Menor	Maior
Número de provetes a ensaiar	Menor	Maior
Simulação do envelhecimento	Um aumento do envelhecimento resulta num aumento da vida à fadiga	Um aumento do envelhecimento resulta numa diminuição da vida à fadiga
Magnitude da vida à fadiga	Geralmente menor	Geralmente maior
Efeito da composição da mistura	Mais sensível	Menos sensível
Dissipação da energia	Rápida	Lenta
Propagação de fendas	Rápido em relação às condições que ocorrem <i>in situ</i>	Mais representativo das condições que ocorrem <i>in situ</i>
Efeito dos períodos de repouso	Maior efeito benéfico	Menor efeito benéfico

Através da análise do Quadro 3.1, inserindo-se no âmbito deste estudo, no que respeita à análise do envelhecimento, conclui-se que a utilização de ensaios a extensão controlada será mais conservativa, dado que, a diminuição da resistência à fadiga é resultante do aumento do módulo de rigidez devido ao envelhecimento (Miranda, 2007).

Conforme referido anteriormente, apenas será descrito neste estudo, o ensaio de flexão em quatro pontos. Contudo, a título meramente indicativo, apresenta-se o Quadro 3.2, que resume os ensaios de caracterização da resistência à fadiga contemplados na norma EN 12697-24.

Quadro 3.2 – Ensaio de avaliação da resistência à fadiga descritos na norma EN 12697-24 (Miranda, 2007)

Tipo de ensaio	Designação do ensaio	Tipo de provete	Esquema do ensaio
Tracção indirecta	Tracção indirecta ou de compressão diametral	Provetes cilíndricos	
Flexão	Flexão em dois pontos	Provetes trapezoidais	
		Provetes prismáticos	
	Flexão em três pontos	Provetes prismáticos	
	Flexão em quatro pontos	Provetes prismáticos	

3.1.3. ENSAIO DE FLEXÃO EM QUATRO PONTOS

O ensaio de flexão em quatro pontos é um dos mais realizados em todo o mundo para caracterização da resistência à fadiga de misturas betuminosas.

Este ensaio consiste na aplicação de um carregamento cíclico representativo das acções do tráfego a que o pavimento está sujeito ao longo da sua vida de serviço. O carregamento é efectuado nos dois apoios internos do provete, verticalmente e perpendicular ao eixo longitudinal, conforme se ilustra no Quadro 3.2. O provete de ensaio é materializado numa viga simplesmente apoiada em quatro pontos, que permitem a livre rotação e translação. Os dois apoios localizados nos extremos da viga impedem o seu deslocamento vertical e os dois apoios internos localizados a um terço dos apoios extremos da viga, simétricos em relação ao seu centro, correspondem aos locais de aplicação das cargas verticais.

A Figura 3.1 ilustra o equipamento de ensaio utilizado na realização deste estudo, existente no LNEC. Este equipamento é composto por uma câmara de controlo de temperatura onde é colocado o aparelho com o provete, um braço pneumático que faz a aplicação de uma força que é transmitida aos dois apoios internos, transdutores e um computador para recolha dos dados do ensaio.

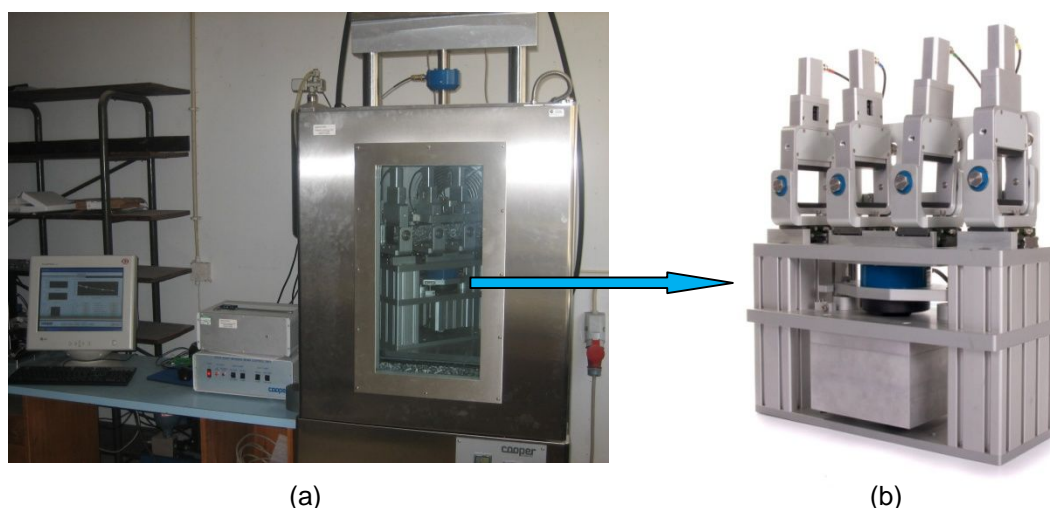


Figura 3.1 – (a) Câmara para realização do ensaio de flexão em quatro pontos do LNEC;
(b) Pormenor do equipamento (www.cooper.co.uk)

Os provetes (vigas) utilizados neste ensaio podem ser moldados em laboratório, ou obtidos através de amostras recolhidas “*in situ*”. Neste estudo, foram utilizados provetes moldados em laboratório.

As dimensões dos provetes estão representadas na Figura 3.2 em termos genéricos, pois não têm dimensões fixadas pela norma EN 12697-24, que estabelece as dimensões em função da dimensão máxima dos agregados (D) da mistura betuminosa utilizada.

A norma refere, que a largura (B) e a altura (H) do provete deverão ser, no mínimo três vezes superiores ao valor da dimensão máxima do agregado utilizado. O comprimento efectivo (L) do provete corresponde à distância entre os dois apoios exteriores e deverá ser, no mínimo seis vezes superior ao valor da dimensão máxima do agregado. Por fim, o comprimento total do provete (L_{tot}), deverá ter uma dimensão que não exceda em mais de 10% o valor do comprimento efectivo.

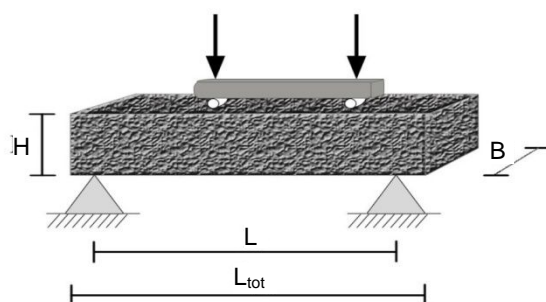


Figura 3.2 – Dimensões genéricas dos provetes utilizados no ensaio de flexão em quatro pontos (Miranda, 2007)

As dimensões deverão ser aferidas para a utilização do provete no ensaio, e segundo a norma EN 12697-24, a diferença entre o valor máximo e mínimo medidos quer para a altura quer largura não deverá variar mais do que 1,0 mm. Igualmente, para o comprimento efectivo, a diferença para o valor máximo e mínimo medidos, não deverá ser superior a 2,0 mm.

As medições da altura e largura deverão ser realizadas nos locais dos apoios e deverão ser efectuadas com uma craveira de erro máximo de 0,1 mm. Da mesma forma, as medições do comprimento efectivo deverão ser efectuadas a metade da altura do provete, com uma régua de erro máximo de 1,0 mm, num total de quatro medições distintas. Todas as dimensões medidas devem ser calculadas, a partir da média aritmética dos valores obtidos para cada uma das dimensões do provete.

Conforme referido anteriormente, a norma EN 13108-20 especifica uma temperatura de ensaio de 20 °C, como tal, o provete deverá ser inserido na câmara de controlo de temperatura, durante um tempo nunca inferior a 1 hora, previamente à realização do ensaio.

O equipamento do ensaio de flexão em quatro pontos permite a realização dos 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. Desta forma, no estudo realizado utilizou-se uma frequência de carregamento de 30 Hz, de acordo com o estabelecido na norma EN 13108-20, para a realização do ensaio de flexão em quatro pontos.

Estes parâmetros (temperatura e frequência de carregamento), deverão ser estabelecidos antes da realização do ensaio, assim como os níveis de tensão ou extensão, que serão função do modo de carregamento escolhido (tensão controlada ou extensão controlada), 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 deformabilidade inicial, medido no centésimo carregamento.

A norma EN 12697-24 estabelece para número mínimo de provetes a ensaiar, um total de 18. Este número é estipulado pela realização do ensaio em três níveis de extensão distintos, para o modo de carregamento escolhido, com um mínimo de seis repetições por nível.

A leitura das deformações provocadas no provete pelos carregamentos sucessivos, é efectuada através de um sensor colocado no ponto central do equipamento, denominado de *Linear Variable Differential Transducer – LVDT*. Este sensor deverá ser calibrado e colocado no ponto de leitura, através de uma porca devidamente apertada e ajustado à face superior do provete, de modo a efectuar leituras muito próximas de zero.

3.2. ENVELHECIMENTO SIMULADO EM LABORATÓRIO

3.2.1. GENERALIDADES

O envelhecimento das misturas betuminosas é devido principalmente, ao envelhecimento do betume, conforme foi referido no capítulo anterior.

Existem vários métodos de ensaio utilizados para a caracterização do envelhecimento do betume, como por exemplo o *Thin Film Oven Test* (TFOT) e o *Rolling Thin Film Oven Test* (RTFOT), que pretendem simular o envelhecimento do betume a curto prazo, ou seja, durante o processo de fabrico, e o *Pressure Aging Vessel* (PAV), que pretende simular o envelhecimento do betume durante a vida de serviço do pavimento (Pellinen *et al.*, 2008).

O principal objectivo deste estudo é avaliar o efeito do envelhecimento na resistência à fadiga de misturas betuminosas. Contudo, os ensaios referidos dizem

respeito apenas ao envelhecimento do betume e não da mistura como um todo. Conforme referido anteriormente, é importante uma abordagem ao fenómeno do envelhecimento, considerando o contributo dos agregados no que respeita ao comportamento da mistura betuminosa.

Os métodos laboratoriais para simulação do envelhecimento de misturas betuminosas mais utilizados são a Câmara de Arco de Xenónio e o *Long-term Oven Aging* (LTOA).

A Câmara de Arco de Xenónio consiste na exposição dos provetes de ensaio, a radiações ultravioletas e infravermelhas que simulam a exposição solar da mistura num processo acelerado de envelhecimento. O *Long-term Oven Aging* pretende simular o envelhecimento de misturas betuminosas a longo prazo e será descrito no ponto seguinte, considerando-se pertinente esta abordagem, pois foi a metodologia adoptada neste estudo.

3.2.2. MÉTODO *LONG-TERM OVEN AGING* (LTOA)

O método de simulação do envelhecimento em laboratório *Long-term Oven Aging* (LTOA) (Bell & Sosnovske, 1994; Bell *et al.* 1994b), pretende simular o envelhecimento das misturas betuminosas a longo prazo.

Este método consiste no envelhecimento dos provetes de ensaio através do seu aquecimento em estufa (Figura 3.3), durante um período de 5 dias, a uma temperatura de 85°C.



Figura 3.3 – Envelhecimento dos provetes em estufa

No âmbito deste estudo, os provetes envelhecidos por este método em laboratório são posteriormente sujeitos ao ensaio de flexão em quatro pontos para caracterização da resistência à fadiga, permitindo desta forma a comparação dos resultados obtidos com os dos provetes ensaiados e não sujeitos ao envelhecimento simulado.

Esta metodologia foi já utilizada em vários estudos, incluindo no nosso país, salientando Batista *et al.* (2006), que concluiu que este método representou ou simulou de forma adequada, o envelhecimento de uma mistura betuminosa rugosa com betume modificado com borracha, aplicada em obra, após 7 anos em serviço.

3.3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Existem diversos métodos de ensaio que permitem a avaliação da resistência à fadiga de misturas betuminosas. Neste trabalho, o método de ensaio utilizado para caracterização do comportamento à fadiga das misturas betuminosas foi o ensaio de flexão em quatro pontos, baseado na norma EN 12697-24, Anexo D. A temperatura foi de 20 °C e a frequência de ensaio de 30 Hz de acordo com as condições de ensaio preconizadas na norma EN 13108-20.

Os procedimentos laboratoriais existentes para a simulação do envelhecimento de misturas betuminosas são, de forma geral, relativamente simples. Em laboratório, o envelhecimento dos provetes de ensaio, poderá por exemplo, ser simulado através de raios ultravioletas e infravermelhos que pretendem reproduzir a acção dos raios solares, ou através de elevadas temperaturas aplicadas ao provete.

O método utilizado neste estudo (LTOA), pretende simular o envelhecimento a longo prazo das misturas betuminosas e a sua adequabilidade está comprovada por vários estudos realizados anteriormente.

Desta forma, a metodologia apresentada, será fundamental no âmbito deste estudo, com a finalidade de atingir os objectivos pretendidos no que respeita a avaliar o contributo do envelhecimento na resistência à fadiga das misturas betuminosas.

4. ESTUDO EXPERIMENTAL PARA AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO ENVELHECIMENTO NA RESISTÊNCIA À FADIGA DE MISTURAS BETUMINOSAS

4.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo será efectuada uma descrição dos materiais utilizados na realização deste estudo, com vista à avaliação do comportamento à fadiga das misturas betuminosas utilizadas.

Será efectuada igualmente, uma avaliação da influência do envelhecimento no comportamento à fadiga das misturas betuminosas, através da simulação do envelhecimento dos provetes de ensaio em laboratório, conforme o procedimento referido anteriormente.

Os provetes de ensaio e a caracterização das misturas betuminosas utilizadas foram efectuados no Núcleo de Infra-Estruturas Rodoviárias e Aeroportuárias (NIRA) do Departamento de Transportes (DT) do LNEC.

4.2. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS NO ESTUDO EXPERIMENTAL

No presente estudo, foram fabricados dois tipos de misturas betuminosas pertencentes ao “grupo do betão betuminoso”, cujos requisitos se encontram especificados na norma europeia EN 13108-1.

Ambas as misturas são pois misturas tradicionais densas, produzidas com agregados graníticos e filler de origem calcária, diferindo apenas no tipo de betume utilizado, conforme se apresenta no Quadro 4.1.

Quadro 4.1 – Misturas betuminosas utilizadas no estudo

Identificação da mistura	Designação de acordo com a EN 13108-1	Tipo de mistura betuminosa	Natureza dos agregados	Tipo de betume
BB1	AC14 surf 35/50	Densa	Graníticos	35/50
BB2	AC14 surf 50/70	Densa	Graníticos	50/70

Conforme referido em 3.2.2, para o estudo do efeito do envelhecimento, alguns dos provetes em mistura betuminosa (BB1 e BB2) compactada, foram submetidos a envelhecimento simulado em laboratório. No caso concreto deste trabalho, o método seguido (LTOA), consistiu no aquecimento em estufa, durante 5 dias a 85°C, dos provetes, tendo-se designado as misturas assim envelhecidas por BB1-ENV e BB2-ENV.

Adoptou-se a mesma composição para as duas misturas conforme se indica no Quadro 4.2.

Quadro 4.2 – Composição das misturas betuminosas

Material	Mistura de Agregados				Betume
	Agregado 8/14	Agregado 4/8	Pó 0/4	Filer	
Percentagem na mistura betuminosa (%)	31,8	20,9	39,4	2,9	5,0

Seguidamente descrevem-se as principais características dos materiais utilizados no fabrico das misturas betuminosas BB1 e BB2.

4.2.1. AGREGADOS

No Quadro 4.3 apresentam-se as principais características das várias fracções granulométricas dos agregados utilizados. Na Figura 4.1 representa-se graficamente a curva granulométrica da mistura de agregados que é idêntica nas duas misturas betuminosas fabricadas em laboratório.

Quadro 4.3 – Características dos agregados utilizados nas misturas betuminosas

Características ⁽¹⁾	Agregado 8/14	Agregado 4/8	Pó 0/4
Fragmentação Los Angeles (NP EN 1097-2)	30%	---	---
Índice de Forma (NP EN 933-4)	4%	20%	---
Índice de Achatamento (NP EN 933-3)	9%	9%	---
Equivalente de areia (NP EN 933-8)	---	---	70%
Azul-de-Metileno (NP EN 933-9)	---	---	0,5g/kg

(1) Dados disponibilizados pela empresa construtora que realizou o estudo de formulação e forneceu os materiais.

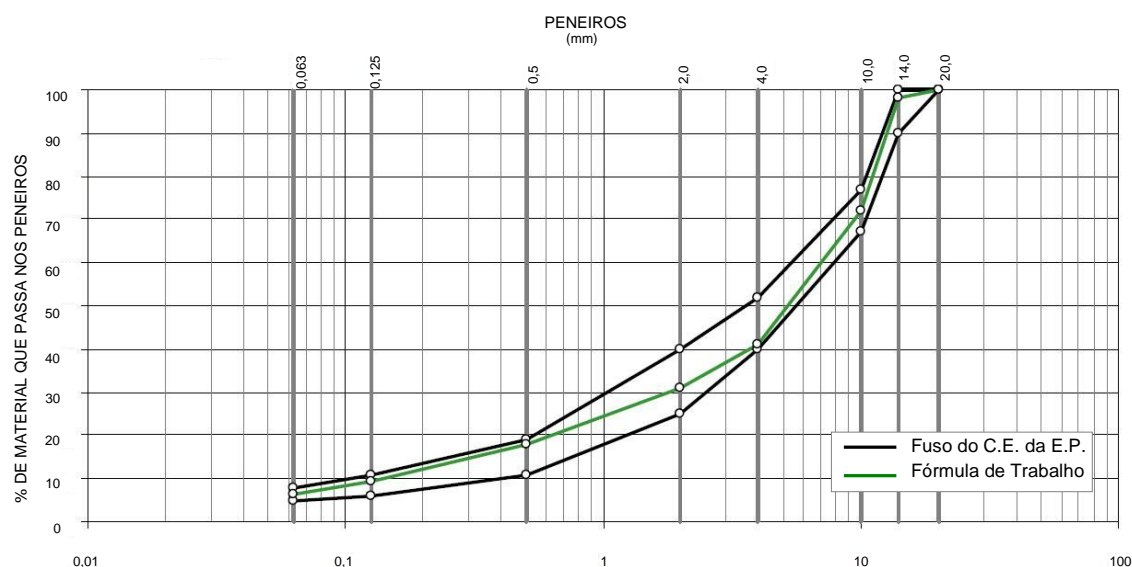


Figura 4.1 – Curva granulométrica da mistura de agregados utilizada nas misturas betuminosas

4.2.2. BETUME

De acordo com o referido anteriormente, as misturas utilizadas no estudo, apenas diferem no tipo de betume. A mistura BB1 é composta com betume 35/50 e a mistura BB2 com betume 50/70.

Após a realização dos ensaios de resistência à fadiga, foi efectuada a recuperação do betume presente nas misturas betuminosas, de modo a ser possível a sua caracterização e permitir a comparação e avaliação do betume constituinte das misturas sujeitas ao envelhecimento.

O processo de recuperação do betume é definido pela norma EN 12697-3.

Na Figura 4.2 ilustra-se parte da sequência das operações levadas a cabo para a recuperação do betume. Para a preparação das amostras, os provetes de mistura betuminosa compactada são colocados em estufa a uma temperatura de aproximadamente 100°C, durante o tempo suficiente para que seja possível desagregar a mistura.

Posteriormente, a mistura foi colocada numa centrifugadora com 1 litro de tolueno (líquido solvente), durante uma hora, de modo a dissolver o betume e a separá-lo dos agregados. Após este processo, o líquido obtido foi novamente colocado numa centrifugadora durante 15 minutos de modo a separar as cinzas do betume.

Seguidamente, a mistura restante, formada apenas pelo betume e pelo tolueno foi sujeita a um processo de destilação, de modo a se obter a separação dos dois componentes (betume e tolueno), através da utilização do equipamento *Rotary Evaporator* (evaporador rotativo), conforme se ilustra na Figura 4.3. Após este processo, com duração máxima de 2 horas, foi finalmente obtido o betume recuperado e colocado numa cápsula, com vista à sua caracterização, neste caso, através dos ensaios de Penetração a 25°C (pen 25) e da Temperatura de Amolecimento (T_{AB}) pelo método do Anel e Bola. Seguidamente é efectuada uma breve síntese destes ensaios e dos resultados obtidos.



Figura 4.2 – Processo de recuperação do betume (separação dos agregados)



Figura 4.3 – Equipamento utilizado no processo de destilação (*Rotary Evaporator*) e cápsula com o betume recuperado (www.lnec.pt)

● ENSAIO DE PENETRAÇÃO A 25 °C

Uma das propriedades consideradas mais importantes para a caracterização do betume é a penetração, que permite avaliar indirectamente a sua viscosidade, tornando possível estimar outras propriedades com base nesta (Branco *et al.*, 2008).

A caracterização desta propriedade foi efectuada de acordo com a norma EN 1426, sendo o ensaio realizado com recurso a um penetrómetro.

Este ensaio é realizado à temperatura de 25°C e consiste em fazer penetrar uma agulha com peso de 100 gramas no betume durante 5 segundos, registando-se a medição da profundidade atingida pela agulha em décimos de milímetro. De acordo com a norma referida, são necessárias três leituras distintas, efectuando posteriormente o cálculo do seu valor médio, que corresponde ao resultado final do ensaio. Nas Figuras 4.4 e 4.5 estão representados respectivamente, o equipamento utilizado e o esquema do ensaio.



Figura 4.4 – Penetrómetro utilizado no ensaio

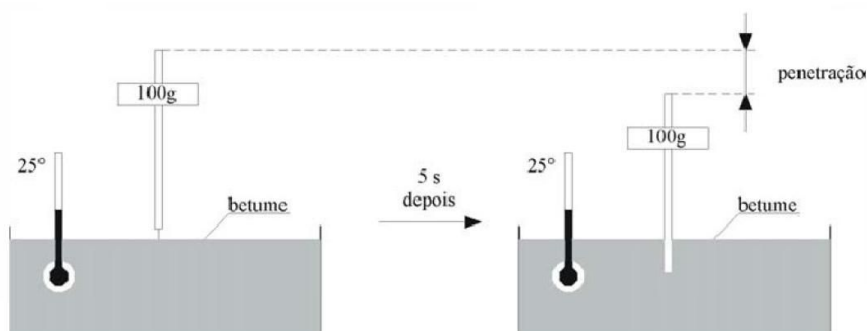


Figura 4.5 – Representação esquemática do ensaio de penetração (Branco *et al.*, 2008)

No Quadro 4.4 apresentam-se os resultados obtidos no ensaio de penetração a 25°C.

Quadro 4.4 – Resultados dos ensaios para determinação da penetração dos betumes recuperados

Identificação da mistura	Pen (0,1 mm)
BB1	36
BB1-ENV	34
BB2	63
BB2-ENV	44

Pela observação e análise dos resultados obtidos no ensaio de penetração, verifica-se que a mistura BB2, produzida com betume 50/70, sofreu um aumento da viscosidade do betume após o seu envelhecimento, traduzido pelo aumento da rigidez do mesmo, como se comprova pela diminuição do valor médio obtido no ensaio de penetração (Pen).

Em relação à mistura BB1, verifica-se que apenas houve um pequeno decréscimo na penetração do betume, após a mistura ter sido submetida a um processo de envelhecimento em laboratório (LTOA), o que não se considera significativo.

• TEMPERATURA DE AMOLECIMENTO – MÉTODO DO ANEL E BOLA

A temperatura de amolecimento é outra das propriedades do betume mais importantes para a sua caracterização.

Com vista à obtenção de resultados relativos a esta propriedade, foram realizados ensaios de caracterização da temperatura de amolecimento (T_{AB}) pelo Método do Anel e Bola, cujo método de ensaio é preconizado na norma EN 1427.

Este ensaio consiste em colocar uma esfera de aço sobre uma película de betume contida num anel de latão, que é colocado em água sujeita a um aumento de temperatura de 5°C por minuto. O betume vai amolecendo gradualmente e a esfera de aço vai deformando a amostra de betume até tocar na base do suporte metálico, instante no qual se regista a temperatura da água. Para a realização do ensaio deverão ser utilizados dois provetes em simultâneo, com vista à obtenção

da média das temperaturas registadas que define o ponto de amolecimento anel e bola (T_{AB}).

Na Figura 4.6 ilustra-se a amostra do betume preparada para a realização do ensaio pelo método do anel e bola, e na Figura 4.7 representa-se esquematicamente o ensaio referido. No Quadro 4.5 estão representados os resultados do ensaio.

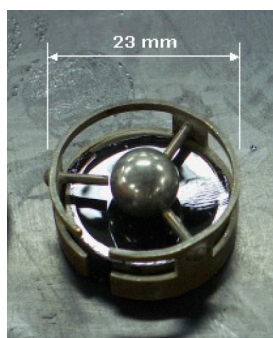


Figura 4.6 – Provette de ensaio do método do anel e bola (www.washington.edu)

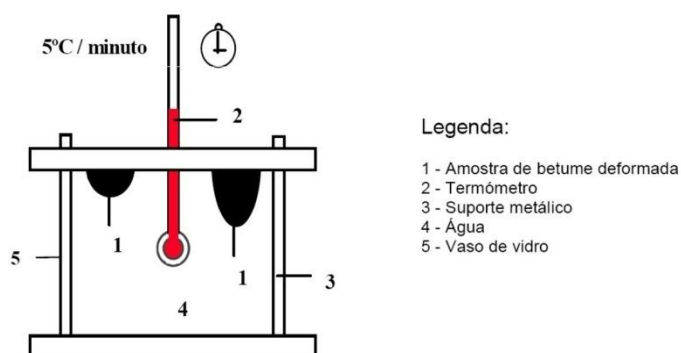


Figura 4.7 – Determinação do ponto de amolecimento de um betume pelo método do anel e bola (adaptado de Branco *et al.*, 2008)

Quadro 4.5 – Resultados do ensaio da temperatura de amolecimento pelo método do anel e bola

Identificação da mistura	T_{AB} (°C)
BB1	54,4
BB1-ENV	56,1
BB2	49,1
BB2-ENV	52,5

Pela observação dos resultados apresentados no Quadro 4.5, verifica-se um ligeiro aumento da temperatura de amolecimento para as amostras de betume recuperado das misturas previamente submetidas ao processo de envelhecimento (LTOA), em relação ao betume recuperado das misturas não envelhecidas.

4.3. FABRICO DOS PROVETES DE ENSAIO

O procedimento de fabrico e compactação dos provetes de ensaio foi igual para ambas as misturas utilizadas neste estudo.

Em primeiro lugar, foi efectuada a preparação das quantidades necessárias de cada fracção de agregados e de betume para o fabrico da mistura. Seguidamente, o betume foi aquecido em estufa durante aproximadamente três horas, a uma temperatura de cerca de 160 °C ou de 170 °C, consoante o tipo de betume, e os agregados foram igualmente aquecidos por um período superior a oito horas.

Após os materiais se encontrarem à temperatura adequada, foi efectuada a “amassadura” garantindo a homogeneidade da mistura do betume com os agregados, através de uma misturadora mecânica com uma haste rotativa (Figura 4.8). Em todo o processo de fabrico deve ser mantida a temperatura da mistura, de forma a garantir a homogeneidade da mesma.



Figura 4.8 – Processo de fabrico das misturas betuminosas

Seguidamente, a mistura betuminosa foi colocada num molde de aço e compactada através do equipamento *Roller Compactor* apresentado na Figura 4.9. A compactação dos provetes de ensaio através deste equipamento segue os procedimentos da norma EN 12697-33.

No presente trabalho, o processo de compactação consistiu na aplicação de 4 níveis de pressão distintos, por meio de uma placa que fornece igualmente movimento vibratório.



Figura 4.9 – Equipamento *Roller Compactor* utilizado para compactação dos provetes prismáticos (www.mastrad.com; www.cooper.co.uk)

Após terminada a compactação, e após o arrefecimento da mistura, as lajes obtidas foram desmoldadas e cortadas com as dimensões mínimas exigidas pela norma EN 12697-24, conforme referido anteriormente, de modo a se obterem os provetes de ensaio como ilustra a Figura 4.10. Os provetes deverão ter um tempo de cura superior a duas semanas e inferior a dois meses, para se poderem começar a efectuar os ensaios de resistência à fadiga.



Figura 4.10 – Laje moldada e provetes de ensaio

Após a preparação dos provetes de ensaio conforme os procedimentos referidos anteriormente, determinou-se a respectiva baridade, de acordo com o preconizado pela norma EN 12697-6 procedimento B (*bulk density – SSD*). Os valores médios

de baridade obtidos para cada uma das misturas (BB1 e BB2) foram idênticos, apresentando-se no Quadro 4.6 os resultados obtidos.

Quadro 4.6 – Composição volumétrica das misturas

Identificação da mistura	Baridade média (kg/m³)	Baridade máxima teórica (kg/m³)	Porosidade média (%)
BB1 e BB2	2428	2496	2,7

4.4. DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE RIGIDEZ

Previamente à realização dos ensaios de resistência à fadiga, foi efectuado um estudo para avaliação do módulo de rigidez das misturas betuminosas utilizadas.

A determinação do módulo de rigidez foi efectuada com recurso a ensaios de cargas repetidas à flexão em quatro pontos sobre os provetes moldados, ou seja, através da utilização do mesmo equipamento utilizado no ensaio de flexão para determinação da vida à fadiga.

Os ensaios para determinação do módulo de rigidez foram realizados igualmente a extensão controlada, com uma amplitude de 50 µm/m, e uma temperatura de 20°C. As frequências de carregamento utilizadas foram definidas segundo a gama proposta pela norma EN 12697-26, com os valores de 1, 4, 8, 10, 30 Hz e novamente 1 Hz. Para cada frequência de carregamento foram aplicadas 50 repetições, de modo a se obter o valor do módulo de deformabilidade inicial segundo a norma referida, que estabelece como número de ciclos para obtenção do valor pretendido, o intervalo entre o 45^o e 100^o carregamento.

Nas Figuras 4.11 e 4.12 representam-se graficamente os resultados obtidos para a evolução do módulo de rigidez com a frequência de ensaio, para ambas as misturas, respectivamente BB1 e BB2, para provetes envelhecidos e não envelhecidos.

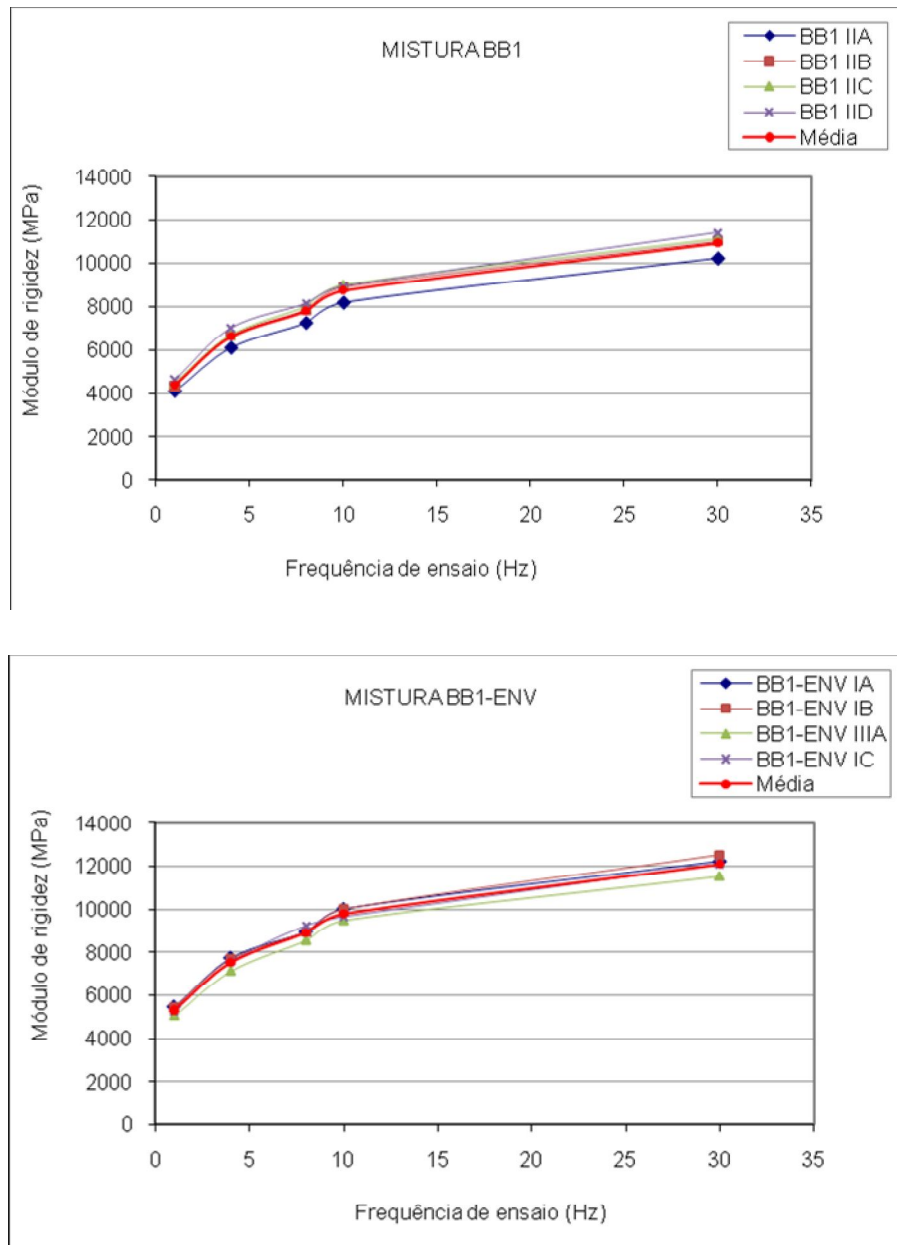


Figura 4.11 – Evolução do módulo de rigidez com a frequência de ensaio da mistura BB1 e BB1-ENV

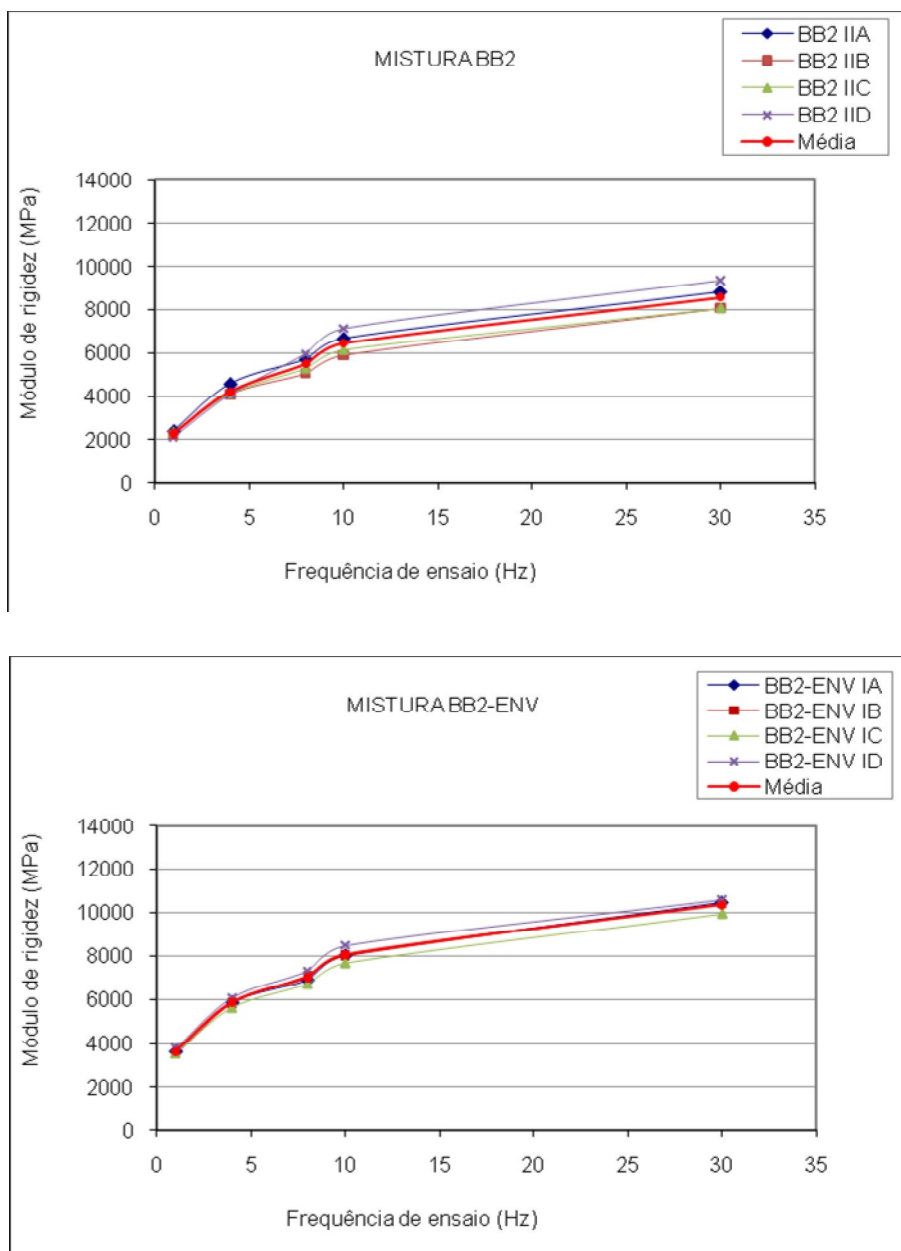


Figura 4.12 – Evolução do módulo de rigidez com a frequência de ensaio da mistura BB2 e BB2-ENV

Conforme se observa pela análise dos gráficos das Figuras 4.11 e 4.12, os valores obtidos para os módulos de rigidez dos quatro provetes ensaiados para cada mistura estão todos próximos dos valores médios.

Para as misturas fabricadas com betume 35/50 obtiveram-se módulos de rigidez para uma frequência de 10 Hz com valor médio de cerca de 9000 MPa e 10000 MPa, respectivamente para a mistura “nova” (BB1) e “envelhecida” (BB1-ENV).

Para as misturas em que se utilizou um betume mais mole, o 50/70, obtiveram-se módulos de rigidez para uma frequência de 10 Hz, com valor médio de cerca de 7000 MPa e 8000 MPa, respectivamente para a mistura “nova” (BB2) e para a mistura “envelhecida” (BB2-ENV). Cabe aqui referir que num estudo recente levado a cabo pela Universidade de Coimbra, Universidade do Minho e LNEC, para um betão betuminoso com características de camada de base ou de regularização, fabricado com 4,2 % de betume 50/70, obtiveram-se módulos de rigidez da ordem de 8000 a 9000 MPa (Picado-Santos *et al.*, 2009).

Assim, e conforme o esperado, os valores do módulo de rigidez da mistura BB1 são mais elevados do que os da mistura BB2, devido aos diferentes tipos de betumes utilizados, que são respectivamente um betume de penetração nominal de 35/50 e 50/70. O betume 35/50 tem para a mesma temperatura, maior viscosidade, tornando a mistura BB1 igualmente mais viscosa, e consequentemente, com maior rigidez.

Da análise dos resultados observa-se ainda que, os valores obtidos para o módulo de rigidez dos provetes envelhecidos em laboratório são superiores em relação aos não envelhecidos. Estes resultados estão de acordo com os valores obtidos nos ensaios de penetração e de temperatura de amolecimento do betume recuperado, mostrando um ligeiro aumento da viscosidade do betume após o seu envelhecimento, que se verifica mais significativo para a mistura BB2.

Os valores obtidos para o módulo de rigidez de ambas as misturas de “betão betuminoso” enquadram-se dentro dos valores considerados típicos para este tipo de material.

4.5. AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO À FADIGA DAS MISTURAS BETUMINOSAS

A avaliação da resistência à fadiga das misturas betuminosas utilizadas neste estudo foi efectuada com base na norma EN 12697-24, através do ensaio de flexão em quatro pontos, conforme referido anteriormente.

Os provetes utilizados foram fabricados em laboratório e previamente à realização dos ensaios, foram acondicionados em estufa, durante um tempo aproximado de 3

horas, a uma temperatura de 20°C, que corresponde à temperatura de realização dos ensaios.

A frequência de carregamento utilizada nos ensaios foi de 30 Hz, de acordo com o estabelecido na norma EN 13108-20 relativa aos “Ensaio de Tipo”.

Os ensaios foram realizados a extensão controlada, com uma gama de valores de amplitude da extensão entre os 50 e os 250 µm/m, com um mínimo de duas repetições por nível, até ser atingido o ponto de rotura dos provetes, ou seja, até se atingir uma redução de 50% em relação ao valor do módulo de rigidez inicial, conforme indicado na norma EN 12697-24.

4.5.1 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

Seguidamente são apresentados e analisados os resultados dos ensaios de flexão em quatro pontos efectuados no âmbito deste estudo, com vista à caracterização do comportamento à fadiga das misturas betuminosas utilizadas.

Através dos resultados obtidos, é possível definir uma lei de fadiga para cada uma das misturas, de modo a compreender o seu comportamento e a efectuar a comparação das diferentes misturas em estudo.

A lei de fadiga que se obtém, para determinadas condições de ensaio é o resultado da relação entre a extensão imposta e o número de aplicações de carga, no ponto em que se atinge o critério de ruína. Esta lei é materializada a partir de uma curva, obtida por regressão linear dos resultados dos provetes ensaiados, podendo ser expressa da seguinte forma:

$$\varepsilon = a N^{-b} \quad (4.1)$$

em que:

ε – amplitude da extensão de tracção inicial (µm/m);

N – vida à fadiga (número de ciclos até se atingir o critério de ruína);

a , b – coeficientes obtidos experimentalmente através de regressão linear (função do tipo de material, condições de ensaio e critério de ruína).

A avaliação da resistência à fadiga é ainda complementada, através da determinação dos seguintes parâmetros: ϵ^6 , que representa a máxima amplitude de extensão de tracção para se atingir um milhão de ciclos; “p” (em que $p = -1/b$), que corresponde à inclinação da recta (lei de fadiga, quando representada em escala logarítmica de N e de ϵ).

Nas Figuras 4.13 e 4.14, estão representadas as leis de fadiga das misturas BB2 e BB2 respectivamente. Por facilidade de interpretação dos resultados e para efeitos comparativos, as leis de fadiga das misturas BB1-ENV e BB2-ENV previamente submetidas a envelhecimento, estão igualmente representadas nas figuras referidas.

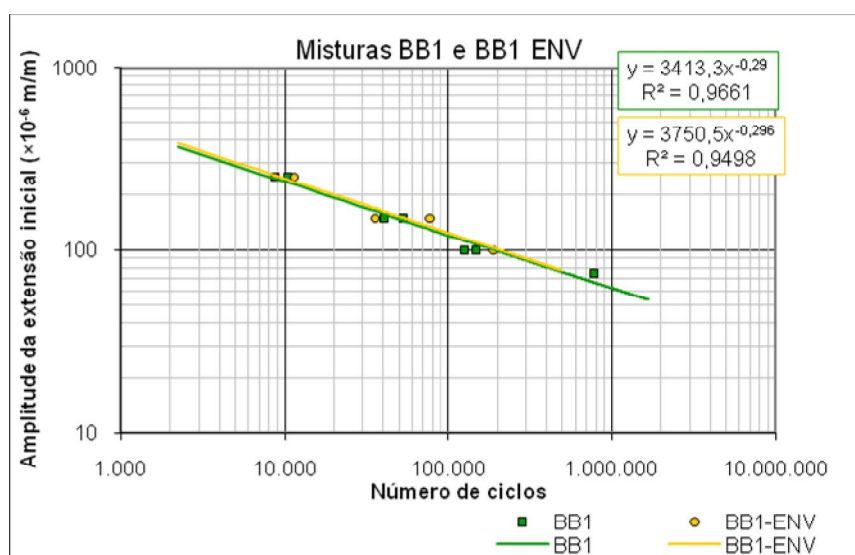


Figura 4.13 – Leis de fadiga da mistura BB1 envelhecida e não envelhecida

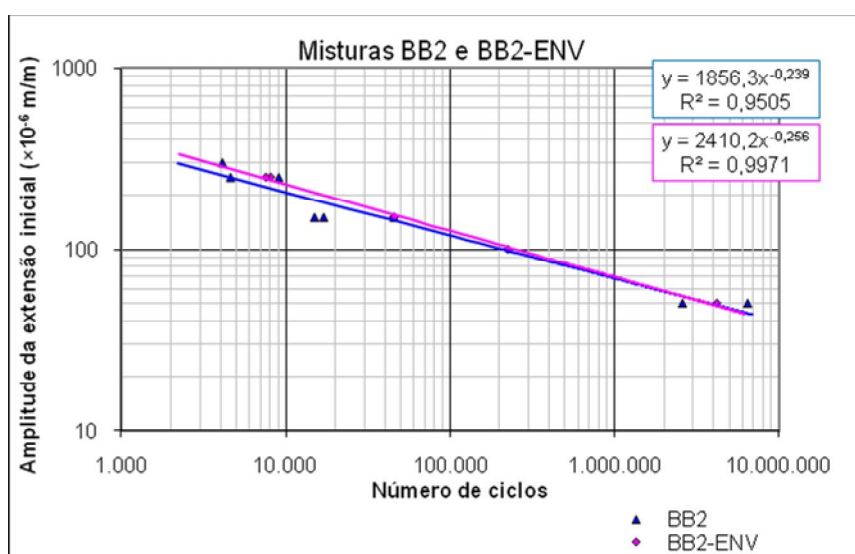


Figura 4.14 – Leis de fadiga da mistura BB2 envelhecida e não envelhecida

Seguidamente, apresenta-se a Figura 4.15, que ilustra as leis de fadiga de ambos os tipos de misturas em simultâneo, envelhecidas e não envelhecidas. No Quadro 4.7 apresentam-se os resultados complementares de resistência à fadiga, igualmente para ambas as misturas, envelhecidas e não envelhecidas.

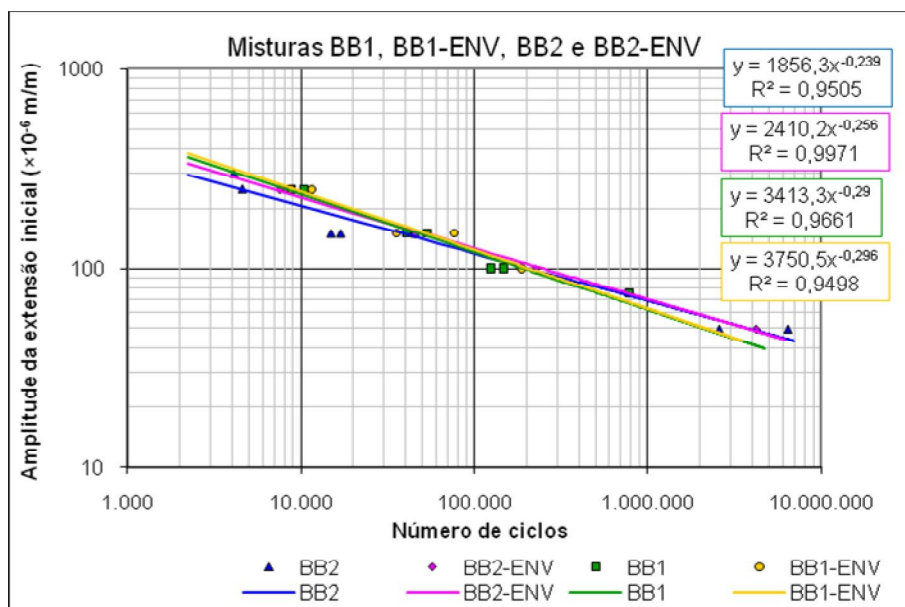


Figura 4.15 – Leis de fadiga das misturas G1 e G2 envelhecidas e não envelhecidas

Quadro 4.7 – Resultados complementares de resistência à fadiga, para ambas as misturas, envelhecidas e não envelhecidas

Identificação da mistura	Resultados	
	ϵ^6 ($\times 10^{-6}$) (m/m)	Inclinação da recta, p
BB1	62	-3,4
BB1-ENV	63	-3,4
BB2	70	-4,2
BB2-ENV	70	-3,9

Através da análise das Figuras 4.13 a 4.15 e do Quadro 4.7, considera-se que as misturas ensaiadas apresentam comportamentos à fadiga semelhantes, com extensão correspondente a uma vida à fadiga de um milhão de cargas (ϵ^6) na ordem dos 60×10^{-6} a 70×10^{-6} m/m.

Os resultados apresentados anteriormente correspondem a uma frequência de ensaio de 30 Hz, sendo de esperar valores de vida à fadiga superiores para ensaios realizados com uma frequência de 10 Hz.

A título indicativo, refere-se que num estudo realizado por Miranda (2007), sobre misturas rugosas e abertas com betume modificado com borracha, se obteve uma diminuição do valor de ϵ^6 superior a 100×10^{-6} m/m, quando se passou de uma frequência de ensaio de 10 Hz para 30 Hz. Refere-se também novamente, o estudo realizado recentemente pela Universidade de Coimbra, Universidade do Minho e LNEC (Picado-Santos *et al.*, 2009), em que foram ensaiados à fadiga provetes de betão betuminoso com características de base (ou de regularização), se obtiveram em ensaios realizados a 10 Hz e 20 °C, valores de ϵ^6 da ordem de 150 a 170 $\mu\text{m}/\text{m}$.

No que concerne ao valor de “p”, relativo à inclinação das rectas para as misturas ensaiadas, obtiveram-se valores da ordem de -3 a -4, ou seja, ligeiramente superiores ao valor frequentemente considerado, de -5 (ver por exemplo, a equação 2.3 relativa à lei de Shell).

Em relação ao estudo do efeito do envelhecimento no comportamento à fadiga das misturas betuminosas utilizadas, é possível observar, que os resultados são semelhantes para as misturas envelhecidas (BB1-ENV e BB2-ENV) e não envelhecidas (BB1 e BB2), com pequenas diferenças que podem ser decorrentes da variabilidade dos ensaios realizados. Os valores obtidos para a extensão correspondente a uma vida à fadiga de um milhão de aplicações de carga (ϵ^6) foram da mesma ordem de grandeza, quer para as misturas “novas”, quer para as misturas submetidas a processo de envelhecimento simulado em laboratório, pelo método LTOA. Pode assim concluir-se que este método de envelhecimento acelerado em laboratório não teve efeito no comportamento à fadiga das misturas de betão betuminoso estudadas. Um dos aspectos que certamente terão contribuído para tal, é o facto de os provetes ensaiados apresentarem uma porosidade relativamente reduzida, na ordem de 3%.

5. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

5.1 CONCLUSÕES

Neste capítulo apresentam-se as principais conclusões obtidas no estudo da resistência à fadiga de misturas betuminosas e da influência do envelhecimento.

O estudo do comportamento à fadiga foi efectuado através da realização de ensaios de fadiga à flexão em quatro pontos a extensão controlada, com temperatura de 20°C e frequência de ensaio de 30 Hz, de acordo com a norma de ensaio EN 12697-24 e a norma de especificação dos materiais EN 13208-20.

Para a realização deste trabalho foram fabricadas em laboratório, duas misturas betuminosas tradicionais densas do tipo “betão betuminoso”, com agregados graníticos e filler de origem calcária. As duas misturas em estudo são semelhantes na sua composição, apenas diferindo no betume utilizado. A mistura BB1 é composta com betume 35/50 e a mistura BB2, com betume 50/70.

Para a avaliação do efeito do envelhecimento no comportamento à fadiga das misturas betuminosas utilizadas, ambas as misturas foram sujeitas a envelhecimento simulado em laboratório, com vista à obtenção de resultados de resistência à fadiga comparativos com as misturas não sujeitas ao envelhecimento.

O processo de envelhecimento simulado em laboratório foi realizado de acordo com os procedimentos do método *Long-term Oven Aging* – LTOA, que consiste na colocação dos provetes em estufa, durante 5 dias a uma temperatura de 85°C.

Considera-se que os objectivos propostos foram atingidos, pois este estudo permitiu avaliar o comportamento à fadiga de duas misturas betuminosas tradicionais, bem como o efeito do envelhecimento na sua resistência à fadiga.

Através da análise dos resultados obtidos a partir nos ensaios para avaliação do comportamento à fadiga e da influência do envelhecimento das misturas betuminosas utilizadas, foi possível obter as seguintes conclusões:

- na determinação do módulo de rigidez foram obtidos valores de acordo com o esperado, constatando-se que a mistura BB1 (com betume 35/50) tem valores superiores à mistura BB2 (com betume 50/70) e que as misturas previamente submetidas ao envelhecimento acelerado apresentam igualmente valores superiores;
- o comportamento à fadiga de ambas as misturas betuminosas estudadas considera-se semelhante, verificando-se pequenas alterações decorrentes da variabilidade dos ensaios de flexão realizados;
- as misturas betuminosas em estudo apresentaram um comportamento à fadiga satisfatório, com extensão correspondente a uma vida à fadiga de um milhão de aplicações de carga (ϵ^6) de 60×10^{-6} a 70×10^{-6} m/m, para uma frequência de ensaio de 30 Hz e uma temperatura de 20 °C;
- para as condições de ensaio referidas, a inclinação das rectas das leis de fadiga (p) obtidas, com valores da ordem de -3 a -4, são ligeiramente superiores ao valor frequentemente considerado de -5;
- as misturas sujeitas ao envelhecimento simulado em laboratório apresentaram um comportamento à fadiga satisfatório, considerando-se que a sua resistência à fadiga não foi susceptível ao processo de envelhecimento a que haviam sido submetidas, pois a partir dos resultados dos ensaios de fadiga (flexão em quatro pontos), observam-se comportamentos semelhantes aos das misturas não sujeitas ao envelhecimento. Considera-se que pequenas diferenças observadas na comparação dos resultados são decorrentes da variabilidade dos ensaios referidos.

5.2 TRABALHOS FUTUROS

Os resultados obtidos e as conclusões retiradas contribuem para um aprofundamento dos conhecimentos do comportamento à fadiga das misturas betuminosas, mais concretamente das misturas betuminosas tradicionais utilizadas neste estudo. Contudo, considera-se necessária a realização de novos estudos, com vista à obtenção de um maior número de resultados, em complemento aos realizados no âmbito deste trabalho e principalmente, através da utilização de diferentes misturas, existindo todo o interesse em abranger um maior número de misturas betuminosas tradicionais, bem como de misturas fabricadas com materiais alternativos.

Deste modo, são apresentadas em seguida, linhas de orientação possíveis para a realização de trabalhos futuros:

- continuar este estudo, utilizando diferentes misturas betuminosas tradicionais, com diferentes quantidades de betume e tipos de agregados, bem como com a utilização de misturas fabricadas com materiais alternativos;
- efectuar estudos comparativos sobre a influência da frequência de carregamento no comportamento à fadiga;
- acompanhar o comportamento de misturas aplicadas em obra, em particular no que concerne à sua resistência à fadiga ao longo do tempo;
- estudar outros métodos de envelhecimento simulado em laboratório, avaliar a sua influência na resistência à fadiga das misturas betuminosas e avaliar a sua representatividade do que acontece em obra.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Anderson, M.; D'Angelo, J.; Huber, G. (2001). *"Forensic investigation of early cracking on I-25 in Denver, Colorado"*. CDOT-DTD-R-2001-10, Colorado Department of Transportation, Colorado, USA.
- Antunes, M. L. B. (2005). *"Modelação do comportamento de pavimentos rodoviários flexíveis"*. Programa de Investigação, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal.
- Baladi, G. Y.; Schorsch, M.; Svasdisant (2003). *"Determining the causes of top-down cracks in bituminous pavements"*. Report No. MDOT-PRCE-MSU-2003-110, Michigan State University, East Lansing, USA.
- Batista, F. A.; Antunes, M. L.; Fonseca, P. (2006). *"Desempenho de misturas betuminosas com BMB aplicadas em Portugal"*. 4º Congresso Rodoviário Português "Estrada 2006", Centro de Congressos do Estoril, Portugal, 5-7 de Abril.
- Bell, C. A.; Ab-wahab, Y.; Cristi, M. E. (1991). *"Investigation of laboratory aging procedures for asphalt-aggregate mixtures"*. Transportation Research Record, Transportation Research Board, N° 1323, pp. 32-42.
- Bell, C. A.; Sosnovske, D. (1994). *"Aging binder validation"*. Strategic Highway Research Program, Transportation Research Board, N° SHRP – A – 384, 81 p.
- Bell, C. A.; Ab-wahab, Y.; Cristi, M. E.; Sosnovske, D. (1994b). *"Selection of laboratory aging procedures for asphalt-aggregates mixtures"*. Strategic Highway Research Program, Transportation Research Board, N° SHRP – A – 383, 91 p.
- Branco, F.; Pereira, P.; Santos, L. P. (2008). *"Pavimentos Rodoviários"*. Edições Almedina, Coimbra, Portugal.
- Castell, M. A.; Ingraffea, A. R.; Irwin, L. H. (2000). *"Fatigue crack growth in pavements"*. Journal of Transportation Engineering, American Society of Civil Engineers, Vol. 126, N° 4, pp. 283-290.

Collop, A. C.; Choi, Y.; Airey, G. D. (2007). *“Effects of pressure and aging in SATS test”*. Journal of Transportation Engineering, American Society of Civil Engineers, Vol. 133, Nº 11, pp. 618-624.

Cooper – www.cooper.co.uk – Ficheiro capturado em 18 de Agosto de 2009.

COST 333 (1999). *“COST 333 – Development of new bitumous pavement design method – Final report of the action”*. Transport Research, European Cooperation in the field of Scientific and Technical Research, European Commission, Directorate General Transport.

Emery, J. J. (2006). *“Evaluation and mitigation of asphalt pavement top-down cracking”*. 2006 Annual Conference of the Transportation Association of Canada, Charlottetown, Prince Edward Island.

Freitas, E. F. (2004). *“Contribuição para o desenvolvimento de modelos de comportamento dos pavimentos rodoviários flexíveis – fendilhamento com origem na superfície”*. Tese de Doutoramento. Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Portugal.

Glover, C. J.; Davison, R. R.; Domke, C. H.; Ruan, Y.; Juristyarini, P.; Knorr, D. B.; Sung, H. J. (2005). *“Development of a new method for assessing asphalt binder durability, with field validation”*. Technical Research Report, Texas Transportation Institute, Nº 0-1872-2.

Harmelink, D. P. E.; Shuler, S.; Aschembrener, P. E. (2008). *“Top-down cracking in asphalt pavements, causes, effects and cures”*. Journal of Transportation Engineering. American Society of Civil Engineers, Vol. 134, Nº 1, pp. 1-6.

Herrington, P. R. E. Y. (1999). *“Effect of inter-molecular association on bitumen oxidation”*. International Journal of Petroleum Science and Technology, Vol. 17, Nº 3-4, pp. 291-318.

Kim, O. K.; Bell, C. A.; Wilson, J. E.; Boyle, G. (1987). *“Development of laboratory oxidative aging procedures for asphalt cements and asphalt mixes”*. Transportation Research Record, Transportation Research Board, Nº 1115, pp. 101-112.

Leidy, J. P. (2001). *“Forensic investigation of the premature failure of LP 375 El Paso County, El Paso District”*. Texas Department of Transportation, Construction Division, Materials and Pavement Section, Austin, Texas.

LNEC – www.lnec.pt – Ficheiro capturado em 27 de Agosto de 2009.

Martínez, G.; Caicedo, B. (2005). *“Efecto de la radiación ultravioleta en el envejecimiento de ligantes y mezclas asfálticas”*. Universidad de los Andes, Bogotá D.C., Colombia.

Mastrad – www.mastrad.com – Ficheiro capturado em 18 de Agosto de 2009.

Mercado, E. A.; Martin, A. E.; Park, E. S.; Spiegelman; Glover, C. J. (2005). *“Factors affecting binder properties between production and construction”*. Journal of Materials in Civil Engineering, American Society of Civil Engineers, Vol. 17, Nº 1, pp. 89-98.

Miranda, H. M. B. (2007). *“Resistência à fadiga de misturas betuminosas com betume modificado com alta percentagem de borracha”*. Tese de Mestrado em Transportes. Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.

Mirza, M. W.; Witczak, M. W. (1995). *“Development of a global aging system for short and long term aging of asphalt cements”*. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 64, pp. 393-430.

Owende, P. M. O.; Hartman, A. M.; Ward, S. M.; Gilchrist, M. D.; O’Mahony, M. J. (2001). *“Minimizing distress on flexible pavements using variable tyre pressure”*. Journal of Transportation Engineering, American Society of Civil Engineers, Vol. 127, Nº 3, pp. 254-262.

Pais, J. C.; Pereira, P. A. A.; Santos, L. P. (2002). *“Variability of laboratory fatigue life of bituminous mixtures using four point bending test results”*. International Journal of Pavements, Vol. 1, Nº 2, pp. 45-58.

Pavement Interactive – www.pavementinteractive.org – Ficheiros capturados em 23 de Abril de 2009.

Pellinen, T.; Xiao, S.; Shah, A. (2008). *“The effect of aging on mechanical properties of hot-mix asphalt”*. International Society for Asphalt Pavements Symposium, 18-20th August, Zurich, Switzerland.

Picado-Santos, L.; Almeida, A.; Pais, J.; Antunes, M.L.; Batista, F.A. (2009). *“Assessment of stiffness and fatigue tests in Portugal”*. Proceedings of the 2nd Workshop on Four Point Bending, Pais (ed.), © 2009, Universidade do Minho, ISBN 978-972-8692-42-1, pp. 105-112.

Proyecto Fenix (2008). *“Guía sobre fisuración descendente”*. www.proyectofenix.es. Ficheiro capturado em 04 de Março de 2009.

Roberts, F. L.; Kandhal, P. S.; Brown, E. R.; Lee, D. Y.; Kennedy, T.W. (1996). *“Hot mix asphalt materials, mixture, design and construction”*. National Asphalt Pavement Association, Research and Education Foundation, Lanham, Md., USA.

Ruan, Y.; Davison, R. R.; Glover, C. J. (2003). *“An investigation of asphalt durability: relationships between ductility and rheological properties for unmodified asphalts”*. International Journal of Petroleum Science and Technology, Vol. 21, N^o 1-2, pp. 231-254.

Shell (2003). *“The Shell bitumen handbook”*. Fifth Edition, Thomas Telford Publishing, London, UK.

Sousa, J. B.; Fonseca, P.; Freire, A.; Pais, J. C. (1999). *“Comparação da vida à fadiga e deformação permanente entre misturas com betume modificado com borracha reciclada de pneus convencionais”*. 10^o Congresso Ibero Latino Americano del Asfalto, Sevilha, Espanha, 1-6 Novembro.

Tangella, S. C. S. R.; Craus, J.; Deacon, J. A.; Monismith, C.L. (1990). *“Summary report on fatigue response of asphalt mixtures”*. Strategic Highway Research Program, Transportation Research Board, N^o SHRP-A-003-A, 147p.

Tonial, I. A. (2001). *“Influência do envelhecimento do revestimento asfáltico na vida de fadiga de pavimentos”*. Tese de Mestrado em Ciências em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

Al-Qadi, I. L.; Diefenderfer, S. R.; Loulizi, A. (2005). *“Fatigue life characterization of Superpave mixtures at the Virginia Smart Road”*. Virginia Transportation Research Council, Virginia Department of transportation and the University of Virginia, Report Nº FHWA/VTRC06-CR1.

Alvarez, C.; Thompson, M. R. (1994). *“Aging phenomenon in asphalt concrete pavements – a literature review”*. Supplemental Report, Illinois University, USA.

Araújo, M. F. (2007). *“Efeito da radiação solar no envelhecimento do concreto betuminoso usinado a quente”*. Tese de Mestrado em Engenharia de Materiais. Universidade Federal de Ouro Preto, Belo Horizonte.

Batista, F. A. (2004). *“Novas técnicas de reabilitação de pavimentos – Misturas betuminosas densas a frio”*. Tese de Doutorado. Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Portugal.

Bell, C. A. (1989). *“Summary report on aging of asphalt – aggregate systems”*. Strategic Highway Research Program, Transportation Research Board, Nº SHRP – A – 305, 121 p.

Bell, C. A.; Wieder, A. J.; Fellin, M. J. (1994a). *“Laboratory aging of asphalt – aggregate mixtures: field validation”*. Strategic Highway Research Program, Transportation Research Board, Nº SHRP – A – 390, 204 p.

Bell, C. A.; Kliever, J. (1995). *“Evaluation aging of asphalt mixtures”*. American Society of Civil Engineer Transportation Congress, Vol. 1.

Bianchetto, H. D.; Recasens, R. M.; Jiménez, F. P. (2007). *“Resistencia al envejecimiento de las mezclas bituminosas en caliente: beneficios y limitaciones de la incorporación de filleres comerciales - Primera parte: estudios en base al método UCL”*. Infraestructura Vial, Nº 17, Febrero.

Bonnaure, F. P.; Huibers, A. H. J. J.; Bonders, A. (1982). *“A laboratory investigation of the influence of rest periods on the fatigue characteristics of bituminous mixes”*. Journal of the Association of Paving Technologists, Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 51, pp. 104-128.

Brown, S.; Zoorob; Collop, A.C. (2002). *“Performance on bituminous and hydraulic materials in pavements”*. Swets & Zeithinger, Lisse.

Capitão, S.; Santos, L. P. (2005). *“Laboratory fatigue performance assessment of high modulus bituminous mixtures”*. 4th International Symposium Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Control, Belfast Hilton Hotel, Northern Ireland, 18 – 19th August.

COST 334 (2000). *“COST 334 – Effects of wide single tyres and dual tyres – Final report of the action”*. Transport Research, European cooperation in the field of Scientific and Technical Research, European Commission, Directorate General Transport.

Dai, S. T.; Van Densen, D.; Beer, M.; Rettner, D.; Cochran, G. (1997). *“Investigation of flexible pavements response to truck speed and FWD load through instrumented pavements”*. Proceedings 8th International Conference on Asphalt Pavements, Seattle, USA, Vol. 1, pp. 141-158.

Daniel, J. S.; Kim, Y. R.; Lee, H. J. (1998). *“Effects of aging on viscoelastic properties of asphalt-aggregates mixtures”*. Transportation Research Record, Transportation Research Board, Washington, D. C., Nº 1630, pp. 21-27.

Daniel, J. S.; Kim, Y. R. (2000). *“Laboratory evaluation of fatigue damage and healing of asphalt mixtures”*. Journal of Materials in Civil Engineering, American Society of Civil Engineers, Vol. 13, Nº 6, pp. 434-440.

Deacon, J. A.; Coplantz, J. S.; Tayebali, A. A.; Monismith, C. L. (1994). *“Temperature considerations in asphalt-aggregate mixture analysis and design”*. Transportation Research Record, Transportation Research Board, Nº 1454, pp. 97-112.

Delgadillo, R.; Bahia, H. U. (2008). *“Effects of temperature and pressure on hot mixed asphalt compaction: Field and laboratory study”*. Journal of Materials in Civil Engineering, American Society of Civil Engineers, Vol. 20, Nº 6, pp. 440-448.

Di Benedetto, H.; Soltani, A. A.; Chaveret, P. (1997). *“Fatigue damage for bituminous mixtures”*. Proceedings of the fifth International Rilem Symposium MTBM, Lyon 97, France, 14-16 Mai.

Dijk, W. (1975). *“Practical fatigue characterization of bituminous mixes”*. Journal of Asphalt Paving Technologists, Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 44, pp. 38-74.

Dongré, R. (2001). *“Predicting fatigue behavior – A historical perspective”*. Federal Highway Administration / DLSI, USA.

Epps, J. A.; Monismith, C. L. (1972). *“Fatigue of asphalt concrete mixtures – Summary of existing information”*. American Society for Testing and Materials Special Technical Publication, American Society for Testing and Materials, N° 38807S, 27 p.

Fee, F. (2001). *“Extended-life asphalt pavement: new approaches to increase durability”*. Transportation Research News, Transportation Research Board, Vol. 215, pp. 12-14.

Freitas, E.F.; Pereira, P. A. A.; Santos, L. P. (2002). *“Estudo do fendilhamento com origem à superfície”*. 2º Congresso Rodoviário Português “Estrada 2002”, LNEC, Lisboa, Portugal, 18-20 de Novembro, Vol. 2, pp. 319-330.

Freitas, E. F.; Pereira, P. A. A.; Picado Santos, L. G.; Pais, J. C. (2003). *“Assesment of top-down cracking causes in asphalt pavements”*. Third International Symposium on Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Control, Guimarães.

Freitas, E. F.; Pereira, P. A. A.; Santos, L. P. (2004). *“O fendilhamento com origem à superfície e a qualidade de construção”*. 3º Congresso Rodoviário Português “A Gestão do Sistema Rodoviário”, FIL, Lisboa, Portugal, 24-26 de Novembro.

Gallego, J.; Prieto, J. N.; Vassallo, J. M. (2006). *“Thermal sensitivity and fatigue life of gap-graded asphalt mixes incorporating crumb rubber from tyre waste”*. 85th Transportation Research Board 2006 Annual Meeting, Albany, USA, 15th.

Grau, R. W. (1993). *“Effects of variable tire pressure on road surfacings”*. Design, Construction, behaviour under traffic and test results, Vol. 1, Technical Report GL-93-20 U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, USA.

Hartman, A. M.; Gilchrist, M. D. (2004). *“Evaluating four-point bend fatigue of asphalt mix using image analysis”*. Journal of Materials in Civil Engineering, American Society of Civil Engineers, Vol. 16, Nº 1, pp. 60-68.

Harvey, J.; Tsai, B. W. (1997). *“Long-term oven aging effects on fatigue and initial stiffness of asphalt concrete”*. Transportation Research Record, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D. C., Vol. 1590.

Helwany, S.; Dyer, J.; Leidy, J. (1998). *“Finite-element analysis of flexible pavements”*. Journal of Transportation Engineering, American Society of Civil Engineers, Vol. 124, Nº 5, pp. 491-499.

Houston, W. N.; Mirza, M. W.; Zapata, C. E.; Raghavendra, S. (2005). *“NCHRP 9-23 Environmental effects in pavement mix and structural design systems”*. NCHRP 9-23, Preliminary Draft, Final Report, Part 1. Arizona State University, Tempe, September.

Huang, E. Y.; Grisham, D. A. (1972). *“Effect of geometric characteristics of aggregates on the fatigue response of bituminous paving mixtures”*. American Society for Testing and Materials, Nº 38813S, 16 p.

Hugo, F.; Kennedy, T. W. (1985). *“Surface cracking of asphalt mixtures in Southern Africa”*. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 54, pp. 454-501.

Jacobs, M. M. J.; Bondt, A. H.; Moleman, A. A. A.; Hopman, P. C. (1992). *“Cracking in asphalt concrete pavements”*. 7th International Conference on Asphalt Pavements, Nottingham, UK, pp. 89-105.

Jacobs, M. M. J.; Moraal, J. (1992). *“The influence of tyre characteristics on the normal stresses in asphalt concrete pavements”*. 3th International Symposium on Heavy Vehicle Weights and Dimensions, Cambridge, UK, pp. 218-224.

Jiménez, F.; Bianchetto, H. D.; Recasens, R. (2007). *“Resistencia al envejecimiento de las mezclas bituminosas en caliente: beneficios y limitaciones de la incorporación de filleres comerciales”*. Infraestructura Vial, Nº 17, Febrero.

Junior, A. (2004). *“Estudo sobre a acção de modificadores no envelhecimento dos ligantes asfálticos e nas propriedades mecânicas e de fadiga das misturas asfálticas”*. Tese de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

Khalid, H. A. (2000b). *“Evaluation of asphalt fatigue properties in the laboratory”*. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Transport, Vol. 141, N° 4, pp. 171-178.

Khalid, H. A. (2002). *“A new approach for the accelerated ageing of porous asphalt mixtures”*. Transport Journal, Proceedings Institution of Civil Engineers, Vol. 153, issue 3, pp. 171-181.

Khalid, H. A.; Artamendi, I. (2005). *“Characterization of fatigue damage of asphalt materials”*. 7th International Conference on Bearing Capacity of Roads, Railway and Airfields, Trondheim, Norway, 27-29th June.

Kim, O. K.; Bell, C. A.; Wilson, J. E.; Boyle, G. (1986). *“Effect of moisture and aging on asphalt pavement life, Part 2 – Effect of aging”*. FHWA-OR-RD-86-01-2, Final Report to Oregon Department of Transportation and Federal Highway Administration, USA.

Kim, S. H.; Kim, N. (2006). *“Development of performance prediction models in flexible pavement using regression analysis method”*. Journal of Civil Engineers, Korean Society of Civil Engineers, Vol. 10, N° 2, pp. 91-96.

Kim, Y. R.; Kim, N.; Khosla, N. P. (1992). *“Effects of aggregate type and gradation on fatigue and permanent deformation of asphalt concrete”*. American Society for Testing and Materials Special Technical Publication, American Society for Testing and Materials, N° 24225S, 19 p.

Kim, Y. R.; Lee, H. J.; Little, D. N. (1997). *“Fatigue Characterization of asphalt concrete using viscoelasticity and continuum damage theory”*. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 66, pp. 520-569

Kim, Y. R.; Lee, H. J. (2003). *“Evaluation of the effect of aging on mechanical and fatigue properties of sand asphalt mixtures”*. Journal of Civil Engineers, Korean Society of Civil Engineers, Vol. 7, Nº 4, pp. 389-398.

Kim, Y. R.; Little, P. E.; Lytton, R. L. (2003). *“Fatigue and healing characterization of asphalt mixtures”*. Journal of Materials in Civil Engineering, American Society of Civil Engineers, Vol. 15, pp. 75-83.

Kim, Y. R.; Back, C.; Underwood, B. S.; Subramanian, V.; Guddati, M. N.; Lee, K. (2008). *“Application of viscoelastic continuum damage model based finite element analysis to predict the fatigue performance of asphalt pavements”*. Journal of Civil Engineering, Korean Society of Civil Engineers, Vol. 12, Nº 2, pp. 109-120.

Kwame, E. O. (2006). *“Fatigue resistance of Hot-mix Asphalt Concrete (HMAC) mixtures using the Calibrated Mechanistic with Surface Energy (CMSE) measurements approach”*. M. Sc. Dissertation. Texas A&M University, Colege Station, USA.

Lay, M. G. (1990). *“Handbook of road technology, Volume I: Planning and pavements”*. Gordon and Breach, New York, pp. 277-292.

Li, Y.; Nazarian, S. (1994). *“Evaluation of aging of hot-mix asphalt using wave propagation technique”*. STP 1265, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, pp. 166-179.

Lima, A. (2003). *“Caracterização mecânica de misturas asfálticas recicladas a quente”*. Tese de Mestrado em Engenharia de Transportes. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

Little, D. N.; Lytton, R. L.; Williams, D.; Kim, Y. R. (1997). *“Propagation and healing of microcracks in asphalt concrete and their contributions to fatigue”*. Asphalt Science and Technology, edited by Arthur M. Usmani, Marcel Dekker, Inc., pp. 149-195.

Little, D. N.; Lytton, R. L.; Williams, D.; Chen, C. W. (2001). *“Microdamage healing in asphalt and asphalt concrete, volume I: Microdamage and microdamage healing, project summary report”*. Federal Highway Administration, Nº FHWA RD-98-141, 84 p.

- Mahmoud, E. M. (2005). *“Development of experimental methods for the evaluation of aggregate resistance to polishing, abrasion and breakage”*. M. Sc. Dissertation. Texas A&M University, Colege Station, USA.
- Minhoto, M. J. C.; Pais, J. C.; Pereira, P. A. A. (2006). *“Influence of temperature variation on the reflective cracking behaviour of asphalt overlays”*. Asphalt Rubber 2006 Conference, Palm Springs, USA, pp. 209-230.
- Morilla, J. A.; Trichês, G. (2003). *“Análise comparativa de envelhecimento em laboratório de nove ligantes asfálticos”*. 34ª Reunião Anual de Pavimentação. São Paulo, Brasil, 24-29 de Agosto, pp. 110-128.
- Mun, S.; Guddati, M. N.; Kim, Y. R. (2006). *“Viscoelastic continuum damage finite element modeling of asphalt pavements for fatigue cracking evaluation”*. Journal of Civil Engineers, Korean Society of Civil Engineers, Vol. 10, Nº 2, pp.97-104.
- Nazarian, S.; Alvarado, G. (2006). *“Impact of temperature gradient on modulus of asphalt concrete layers”*. Journal of Materials in Civil Engineering, American Society of Civil Engineers, Vol. 18, Nº 4, pp. 492-499.
- Pais, J. C.; Sousa, J. B.; Saïm, R.; Pereira, P. A. A. (2001). *“Effect of crumb rubber origin on asphalt rubber hot mix laboratory performance”*. 2nd International Symposium on Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Control, Auburn, Alabama, USA, July 29-August 1.
- Park, D. W. (2008). *“Prediction of pavement fatigue and rutting life using different tire types”*. Journal Of Civil Engineers, Korean Society of Civil Engineers, Vol. 12, Nº 5, pp. 297-303.
- Park, D. Y.; Buch, N.; Suh, Y. C. (2001). *“Development of fatigue cracking prediction model for flexible pavements”*. Journal of Civil Engineers, Korean Society of Civil Engineers, Vol. 5, Nº 4, pp. 397-402.
- Pell, P. S. (1971). *“Fatigue of bituminous materials in flexible pavements”*. Journal of the Institution of Highway Engineers, August, 17-21.
- Pell, P. S.; Cooper, K. E. (1975). *“The effect of testing and mix variables on the fatigue performance of bituminous materials”*. Journal of the Association of Asphalt

Paving Technologists, Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 44, pp. 1-37.

Raad, L.; Saboundjian, S.; Mimassian, G. (2001). *“Field aging effects on fatigue of asphalt concrete and asphalt-rubber concrete”*. Transportation Research Record, Transportation Research Board, Nº 1767, pp. 126-134.

Raghavendra, S.; Zapata, C. E.; Mirza, M. W.; Houston, W.; Witczak, M. W. (2008). *“Aging of compacted asphalt mix: A case study”*. International Society for Asphalt Pavements Symposium, 18-20th August, Zurich, Switzerland.

Raithby, K. D.; Sterling, A. B. (1972). *“Some effects of loading history on the performance of rolled asphalt”*. Report Transport and Road Research Laboratory, Transport and Road Research Laboratory, Nº LR471.

Read, J. M.; Brown, S. F. (1996). *“Practical evaluation of fatigue strength for bituminous mixtures”*. Proceeding of the Euroasphalt and Eurobitume Congress, Strasbourg, France, 7-10th May.

Read, J. M.; Collop, A. C. (1997). *“Practical fatigue characterization of bituminous paving mixtures”*. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 66, pp. 74-108.

Rudensky, A. V. (1997). *“Asphalt concrete fatigue properties”*. Proceeding of the fifth International Rilem Symposium MTBM, Lyon 97, France, 14-16 Mai.

Saboundjian, S. (1999). *“Fatigue behavior of conventional and rubber asphalt mixes”*. Ph. D. Dissertation, University of Alaska Fairbanks, USA.

Saboundjian, S.; Knopke, T.; Radt, L. (2004). *“Field aging effect of asphalt rubber mixes and conventional mixes for runway surface applications”*. 2004 FFA Worldwide Airport Technology Transfer Conference, Atlantic City, USA, April.

Seo, Y.; El-Haggan, O.; King, M., Lee, S. J.; Kim, Y. R. (2007). *“Air void models for the dynamic modulus, fatigue cracking, and rutting of asphalt concrete”*. Journal of Materials in Civil Engineering, American Society of Civil Engineers, Vol. 19, Nº 10, pp. 874-883.

Seo, Y.; Kim, Y. R. (2008). *“Using acoustic emission to monitor fatigue damage and healing in asphalt concrete”*. Journal of Civil Engineers, Korean Society of Civil Engineers, Vol. 12, Nº 4, pp. 237-243.

Shell (1990). *“The Shell bitumen handbook”*. First Edition, Shell Bitumen, London, UK.

Shin, H. C. (2006). *“Development of a semi-parametric stochastic model of asphalt pavement crack initiation”*. Journal of Civil Engineers, Korean Society of Civil Engineers, Vol. 10, Nº 3, pp. 189-194.

SHRP (1994). *“Fatigue response of asphalt-aggregates mixes”*. Strategic Highway Research Program, Transportation Research Board, Nº SHRP-A-404, 309 p.

Shu, X.; Huang, B. (2008). *“Dynamic modulus prediction of HMA mixtures based on the viscoelastic micromechanical model”*. Journal of Materials in Civil Engineering, American Society of Civil Engineers, Vol. 20, Nº 8, pp. 530-538.

Siddharthan, R. V.; Krishnamenom, N.; El-Mously, M.; Sebraly, P. E. (2002). *“Investigation of tire contact stress distributions on pavement response”*. Journal of Transportatio Engineering, American Society of Civil Engineers, Vol. 128, Nº 2, pp. 136-144.

Sousa, J. B.; Pais, J. C.; Prates, M.; Barros, R.; Langlois, P.; Leclerc, A. M. (1998). *“Effect of aggregate gradation on fatigue life of asphalt concrete mixes”*. Transportation Research Record, Transportation Research Board, Nº 1630, pp. 62-68.

Tayebali, A. A.; Rowe, G.; Sousa, J. (1992). *“Fatigue response of aggregate-asphalt mixtures”*. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 61, pp. 333-360.

Tayebali, A. A.; Deacon, J. A.; Coplantz, J. S.; Harvey, J. T.; Monismith, C. L. (1994). *“Mixture and mode-of-loading effects on fatigue response of asphalt-aggregate mixtures”*. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 63, pp. 118-151.

Thom, N. H.; Choi, Y. K.; Collop, A. C. (2002). *“Top-down cracking, damage and hardening in practical flexible pavement design”*. 9th International Conference on Asphalt Pavements, Copenhagen, 1:10-1.

Thom, N. H. (2006). *“Asphalt cracking: a Nottingham perspective”*. Universidade do Minho, Engenharia Civil, Revista nº 26, pp. 75-84.

Tia, M.; Ruth, B. E.; Charai, C. T.; Shian, J. M.; Richardson, D.; Williams, J. (1988). *“Investigation of original and in service asphalt properties for the development of improved specifications – Final phase of testing and analysis”*. Final Report, Engineering and Industrial Experiment Station, University of Florida, Gainesville, Florida, USA.

Uhlmeier, J. S.; Willoughby, K.; Pierce, L. M.; Mahoney, J. P. (2000). *“Top-down cracking in Washington state asphalt concrete wearing course”*. Transportation Research Record, Nº 1730, pp. 110-116.

Ullidtz, P. (1987). *“Pavement analysis”*. Elsevier, Amsterdam, pp. 177-198.

University of Washington – www.washington.edu – Ficheiro capturado em 02 de Setembro de 2009.

Vallerga, B.; Fiuu, F.; Hicks, R. (1972). *“Effect of asphalt aging on the fatigue properties of asphalt concrete”*. Proceeding, Third International Conference on Asphalt Pavements, Ann Arbor, Michigan, 1972, pp. 595-617.

Wang, J.; Pang, L.; Wu, S.; Lin, Q.; Chen, Z. (2008). *“Effect of ageing on fatigue properties of asphalt”*. Wuhan University of Technology, Wuhan, China.

Yildirim, Y.; Ideker, J.; Hazlett, D. (2006). *“Evaluation of viscosity values for mixing and compaction temperatures”*. Journal of Materials in Civil Engineering, American Society of Civil Engineers, Vol. 18, Nº 4, pp. 545-553.

Zuo, G.; Drumm, E. C.; Meier, R. W. (2007). *“Environmental effects on the predicted service life of flexible pavements”*. Journal of Transportation Engineering. American Society of Civil Engineers, Vol. 133, Nº 1, pp. 47-56.

NORMAS

EN 1426:2007. *“Bitumen and bituminous binders – Determination of needle penetration”*. Comité Europeu de Normalização, Bruxelas.

EN 1427:2007. *“Bitumen and bituminous binders – Determination of the softening point – Ring and Ball method”*. Comité Europeu de Normalização, Bruxelas.

EN 12697-3:2005. *“Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt – Part 3: Bitumen recovery: Rotary evaporator”*. Comité Europeu de Normalização, Bruxelas.

EN 12697-6:2003+A1:2007. *“Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt – Part 6: Determination of bulk density of bituminous specimens”*. Comité Europeu de Normalização, Bruxelas.

EN 12697-24:2004+A1:2007. *“Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt – Part 24: Resistance to fatigue”*. Comité Europeu de Normalização, Bruxelas.

EN 12697-26:2004. *“Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt – Part 26: Stiffness”*. Comité Europeu de Normalização, Bruxelas.

EN 12697-33:2003+A1:2007. *“Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt – Part 33: Specimen prepared by roller compactor”*. Comité Europeu de Normalização, Bruxelas.

EN 13108-20:2006/AC:2008. *“Bituminous mixtures – Material specifications – Part 20: Type testing”*. Comité Europeu de Normalização, Bruxelas.