



Universidade do Porto
Faculdade de Engenharia

FEUP



Adriano Manuel da Silva Teixeira

Caracterização da Resistência à Fadiga de Mistura Betuminosas em Equipamento Servopneumático

Porto, 2000

**UNIVERSIDADE DO PORTO
FACULDADE DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

**CARACTERIZAÇÃO DA RESISTÊNCIA À FADIGA
DE MISTURAS BETUMINOSAS EM EQUIPAMENTO
SERVOPNEUMÁTICO**

ADRIANO MANUEL DA SILVA TEIXEIRA

Dissertação apresentada na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto para a obtenção do grau de Mestre em Vias de Comunicação

FEUP 2000

625(043)/RENa/CAR

UNIVERSIDADE DO PORTO		
Faculdade de Engenharia		
BIBLIOTECA M		
N.º	60187	
CDU	625(043)	
Data	12 / 3	2002

Resumo

Este trabalho pretende apresentar o comportamento à fadiga de misturas betuminosas usadas em pavimentos flexíveis, fazendo a apresentação das metodologias e equipamentos existentes para a quantificação dessa característica. Descreve também as concepções teóricas que conduziram ao desenvolvimento do ensaio de flexão em viga, por carregamento central em dois pontos, em equipamento servopneumático. São ainda apresentados os resultados obtidos em ensaios realizados num macadame betuminoso, extraído de uma camada de base de um pavimento, procurando estabelecer as variações de comportamento à fadiga da mistura betuminosa, associadas às variações da percentagem em betume e do índice de vazios da mistura betuminosa.

Abstract

This paper presents the determination of the resistance to fatigue of bituminous mixtures used in flexible pavements, introducing the methodology and equipment already in existence for the quantification of this feature. It also describes the theoretical concepts behind the development of the four point load bending test by means of servopneumatic equipment. Moreover, it presents the results obtained in tests performed in a bituminous tar macadam extracted from the base coarse of a road, thus aiming at establishing the variations of the bituminous mixture in terms of fatigue performances associated with the variations in the bitumen content and the void ratio of the bituminous mixture.

Résumé

Ce travail présente la détermination de la résistance à la fatigue des mélanges hydrocarbonés employés dans les chaussées flexibles, présentant les méthodologies et les équipements déjà existants pour la quantification de cette caractéristique. Il décrit aussi les concepts théoriques qui ont conduit au développement de l'essai de flexion en quatre points sur des poutres, à l'aide d'équipement servo-pneumatique. Sont aussi présentés les résultats obtenus dans des essais réalisés sur un macadam bitumineux extrait de la couche de base d'une chaussée, ayant pour but la détermination des variations de la résistance à la fatigue du mélange hydrocarboné par rapport aux variations du teneur en bitume et de l'indice de vides de la mélange bitumineux.

Agradecimentos

A todos que me ajudaram e apoiaram neste projecto quero aqui expressar os meus mais sinceros agradecimentos.

No CICCOPN:

Aos membros do Conselho de Administração, Dr António de Faria Miranda, Dra Maria Teresa Themudo Campos, Engº Joaquim Ferreira dos Santos, Engº Joaquim da Silva Gomes, pela oportunidade concedida

Ao Director, Engº Amílcar Sampaio Rodrigues, pelo incentivo e compreensão sempre demonstrados

Ao Ferreira da Silva pelo apoio

Ao Leonardo pela colaboração

No LGMC:

Ao Alves Ribeiro pelos muitos ensinamentos, participação, apoio e entusiasmo

Ao Nuno, pelas orientações e pelo alento nos momentos mais complicados

Ao Eduardo Neves pela ajuda sempre pronta

A todos os técnicos sem excepção pelo muito que ajudaram com o seu trabalho e compreensão

Na FEUP:

Ao Professor Jaime Ribeiro pela disponibilidade e conselhos sempre sábios

Ao Engº Francisco Freitas pela colaboração

No ISEP

Ao Pinto Coelho pelo incentivo

Aos meus alunos

Ao Dr Barreira de Sousa pelo interesse demonstrado

Ao Ângelo por todo o trabalho e pela entrega constante, sem a sua colaboração este trabalho ficaria incompleto

Ao Fernando Castelo Branco pelo aconselhamento

Ao Castilho pela amizade e colaboração

À Drª Conceição Azevedo um enorme agradecimento pelo muito que aprendi neste projecto, pelo entusiasmo sempre demonstrado na orientação do trabalho e pela disponibilidade

À minha família:

Ao meu sobrinho João Pedro pela ajuda

Um agradecimento muito especial à Gi ao Diogo e ao Afonso

pelo muito tempo que vos roubei
pelo apoio
pelo entusiasmo
pela compreensão

sei que sem eles nada tinha feito.

ÍNDICE	Pág.
 CAPÍTULO 0	
CONSIDERAÇÕES INTRODUTÓRIAS	1
 CAPÍTULO I	
A FADIGA NOS PAVIMENTOS BETUMINOSOS	
 1.1 Introdução	5
1.2 Dimensionamento dos pavimentos flexíveis	6
1.3 Comportamento de uma mistura betuminosa à fadiga	12
1.3.1 Betumes	12
1.3.1.1 Comportamento	12
1.3.1.2 Módulo de rigidez	14
1.3.1.3 Caracterização dos betumes	19
1.3.1.3.1 O caso Português	19
1.3.1.3.2 A metodologia SHRP	21
1.3.2 Agregados	29
1.3.3 Compactação	30
1.3.4 Tráfego	31
1.3.5 Temperatura	32
1.3.6 Rigidez das misturas betuminosas	32
1.4 As leis de fadiga	37
1.5 Avaliação do comportamento à fadiga das misturas betuminosas	41
1.6 Conclusões	43

CAPÍTULO II

OS VÁRIOS TIPOS DE ENSAIOS DE FADIGA

2.1	Introdução	45
2.2	Princípios gerais	45
2.3	Principais diferenças entre os métodos de ensaio	48
2.3.1	Tipo de carregamento	48
2.3.2	Forma de carregamento	50
2.3.3	Geometria e dimensões dos provetes	51
2.3.4	Condições de ensaio	51
2.4	Preparação dos provetes para ensaio	54
2.4.1	Métodos utilizados na obtenção dos provetes	54
2.4.2	Métodos utilizados na compactação das misturas betuminosas	55
2.4.2.1	Métodos para a compactação de provetes cilíndricos	56
2.4.2.1.1	Compactador Marshall	56
2.4.2.1.2	Vibrocompactador	57
2.4.2.1.3	Compressão estática	58
2.4.2.1.4	Compactador giratório	59
2.4.2.1.5	Compactador Kneading	61
2.4.2.2	Métodos para a compactação de provetes prismáticos e placas	62
2.4.2.2.1	Compactação com cilindro metálico de rasto liso	62
2.4.2.2.2	Compactador com uma ou duas rodas com pneumáticos	63
2.4.2.2.3	Compactador com segmento de roda metálica	64
2.4.2.2.4	Compactador com placas metálicas com acção Kneading	65
2.4.3	Envelhecimento da mistura betuminosa	65
2.5	Tipos de ensaios e equipamentos existentes na determinação da vida à fadiga de misturas betuminosas	66
2.5.1	Ensaio de compressão diametral	67
2.5.2	Ensaio de flexão em viga com aplicação central de carga	70
2.5.3	Ensaio de flexão em provete trapezoidal em consola	72
2.6	Conclusões	74

CAPÍTULO III

PROCEDIMENTO DO ENSAIO DE FLEXÃO SIMPLES POR CARREGAMENTO EM DOIS PONTOS EM EQUIPAMENTO SERVOPNEUMÁTICO

3.1	Introdução	75
3.2	Descrição do equipamento	77
3.2.1	Reservatório de ar comprimido	77
3.2.2	Estrutura de carregamento	78
3.2.3	Unidade de controlo e aquisição de dados	84
3.2.4	Computador e programa de aquisição de dados e tratamento de resultados	87
3.2.5	Compressor	88
3.2.6	Câmara climática	89
3.3	Características obtidas nos ensaios	90
3.4	Técnica de ensaio	95

CAPÍTULO IV

AValiação da vida à fadiga de uma mistura betuminosa

4.1	Introdução	99
4.2	Breve descrição da obra	100
4.3	Dimensionamento do pavimento	101
4.3.1	Metodologia utilizada no dimensionamento	101
4.3.2	Estrutura do pavimento	103
4.4	Formulação do macadame betuminoso usado em obra	104
4.4.1	Características dos agregados e do filer	104
4.4.2	Características do betume	109
4.4.3	Características da mistura betuminosa	110
4.5	Fabrico da mistura e execução da camada	111
4.5.1	Central betuminosa	111
4.5.2	Pavimentadora	111

4.5.3	Cilindros compactadores	111
4.5.4	Execução da camada	112
4.6	Extracção das amostras por serragem de placas do pavimento	112
4.7	Preparação dos provetes	114
4.8	Ensaios de fadiga	115
4.9	Apresentação dos resultados obtidos	117
4.10	Conclusões	132

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES

5.1	Equipamento	135
5.2	Ensaios realizados	136
5.3	Prosseguimento de trabalhos futuros	139

BIBLIOGRAFIA	141
---------------------	------------

Índice de Figuras

- Figura 1.1 Extensões consideradas no cálculo dos pavimentos flexíveis
- Figura 1.2 Fluxograma do dimensionamento estrutural de um pavimento flexível
- Figura 1.3 Modelo do comportamento viscoelástico de uma mistura betuminosa
- Figura 1.4 Esquema das deformações observadas num ensaio de fluência de uma mistura betuminosa
- Figura 1.5 Módulo complexo de um betume
- Figura 1.6 Representação gráfica do módulo complexo de dois betumes
- Figura 1.7 Nomograma de Van der Poel
- Figura 1.8 Estufa RTFOT
- Figura 1.9 Câmara de envelhecimento pressurizada
- Figura 1.10 Viscosímetro rotativo
- Figura 1.11 Reómetro de corte
- Figura 1.12 Ensaio de flexão em viga de um betume
- Figura 1.13 Esquema do ensaio de tracção directa de um betume
- Figura 1.14 Variação da extensão com o nível de tensão instalado (representação esquemática)
- Figura 1.15 Variação da rigidez de uma mistura betuminosa com a temperatura, para diferentes tempos de carregamento (representação esquemática)
- Figura 1.16 Variação da extensão de tracção com a tensão de tracção instalada para diferentes temperaturas (representação esquemática)
- Figura 1.17 Variação da rigidez de uma mistura betuminosa com a frequência, para diferentes temperaturas (representação esquemática)
- Figura 1.18 Variação das extensões de tracção com as tensões de tracção instaladas, para diferentes frequências (representação esquemática)
- Figura 1.19 Variação da rigidez de uma mistura betuminosa com o número de ciclos de carga (representação esquemática)

- Figura 1.20 Ábaco para a obtenção do módulo de rigidez de uma mistura betuminosa
- Figura 1.21 Relação entre a vida à fadiga de uma mistura betuminosa e a extensão de tracção
- Figura 1.22 Variação da vida à fadiga de uma mistura betuminosa com a temperatura (representação esquemática)
- Figura 1.23 Variação da vida à fadiga com a tensão/extensão instalada (representação esquemática)
- Figura 1.24 Variação da vida à fadiga com o tipo de carregamento (representação esquemática)
- Figura 2.1 Distribuição das tensões horizontais num pavimento flexível originadas pelas acções verticais devidas ao tráfego
- Figura 2.2 Esquemas dos diagramas de tensões e extensões para os dois tipos de carregamento
- Figura 2.3 Carregamento sinusoidal em tensão controlada
- Figura 2.4 Carregamento com forma rectangular em tensão controlada
- Figura 2.5 Compactador Marshall
- Figura 2.6 Martelo vibrocompactador
- Figura 2.7 Compressão estática
- Figura 2.8 Compactador giratório
- Figura 2.9 Compactador giratório (PCG) desenvolvido no LCPC
- Figura 2.10 Compactador Kneading
- Figura 2.11 Compactador com pneumáticos desenvolvido no LCPC
- Figura 2.12 Compactador com segmento de roda metálica
- Figura 2.13 Compactador com segmento de roda metálica (representação do funcionamento)
- Figura 2.14 Compactador com placas metálicas
- Figura 2.15 Equipamento para a realização do ensaio de compressão diametral

- Figura 2.16 Ensaio de compressão diametral. Esquema de carregamento e do diagrama de tensões instaladas no provete
- Figura 2.17 Ensaios de flexão com carregamento central num ponto
- Figura 2.18 Ensaio de flexão com carregamento central em dois pontos
- Figura 2.19 Ensaio de flexão em provete trapezoidal em consola
- Figura 3.1 Esquema de carregamento e funcionamento estrutural do provete
- Figura 3.2 Equipamento utilizado na parte experimental
- Figura 3.3 Reservatório de ar comprimido
- Figura 3.4 Estrutura de carregamento
- Figura 3.5 Estrutura de carregamento (pormenor)
- Figura 3.6 Painel frontal de comandos da estrutura de carregamento
- Figura 3.7 Barras transversais de aperto
- Figura 3.8 Pormenor da estrutura central
- Figura 3.9 Esquema da servoválvula reguladora do ar comprimido
- Figura 3.10 Esquema do princípio de funcionamento do sistema servocontrolado
- Figura 3.11 Unidade de controlo e aquisição de dados
- Figura 3.12 Câmara climática e estrutura de carregamento
- Figura 4.1 Representação esquemática do pavimento betuminoso do 2º Lanço do IC 25
- Figura 4.2 Curvas granulométricas do fuso e da mistura de agregados
- Figura 4.3 Locais de extracção das placas de macadame betuminoso
- Figura 4.4 Provetes prismáticos utilizados nos ensaios de fadiga
- Figura 4.5 Variação da rigidez para um valor de extensão de $600\ \mu\epsilon$
- Figura 4.6 Variação da rigidez para um valor de extensão de $400\ \mu\epsilon$
- Figura 4.7 Variação da rigidez para um valor de extensão de $200\ \mu\epsilon$

- Figura 4.8 Variação do valor da rigidez das misturas betuminosas com o valor da extensão de tracção
- Figura 4.9 Lei de fadiga para o macadame compactação corrente
- Figura 4.10 Lei de fadiga para o macadame menor compactação
- Figura 4.11 Lei de fadiga para o macadame com percentagem superior de betume
- Figura 4.12 Lei de fadiga para o macadame com percentagem inferior de betume
- Figura 4.13 Leis de fadiga das misturas betuminosas estudadas
- Figura 4.14 Variação da energia dissipada acumulada para o macadame menor compactação para os três níveis de extensão
- Figura 4.15 Variação da energia dissipada acumulada para o macadame compactação corrente para os três níveis de extensão
- Figura 4.16 Variação da energia dissipada acumulada para o macadame com percentagem superior de betume para os três níveis de extensão
- Figura 4.17 Variação da energia dissipada acumulada para o macadame com percentagem inferior de betume para os três níveis de extensão

Índice de Quadros

- Quadro I.1 Tipos de betume e exigências de conformidade
- Quadro I.2 Ensaio sobre betumes preconizados na metodologia SUPERPAVE
- Quadro II.1 Correspondência entre os factores que influenciam a vida à fadiga de uma mistura betuminosa e as variáveis do método de ensaio
- Quadro II.2 Vantagens/desvantagens do fabrico das misturas betuminosas em laboratório
- Quadro IV.1 Fuso granulométrico exigido para a mistura de agregados
- Quadro IV.2 Granulometria dos agregados constituintes da mistura betuminosa
- Quadro IV.3 Características físicas e mecânicas dos agregados constituintes da mistura betuminosa
- Quadro IV.4 Percentagens de cada um dos agregados utilizados na mistura de agregados
- Quadro IV.5 Granulometria da mistura de agregados
- Quadro IV.6 Características do betume utilizado no fabrico do macadame betuminoso
- Quadro IV.7 Identificação e localização das placas de macadame betuminoso extraídas do pavimento
- Quadro IV.8 Valores do coeficiente de Poisson
- Quadro IV.9 Valores da massa volúmica aparente obtidos nos ensaios
- Quadro IV.10 Valores das percentagens em betume obtidos nos ensaios
- Quadro IV.11 Resumo dos valores obtidos nos ensaios de fadiga para uma extensão de 600 $\mu\epsilon$
- Quadro IV.12 Resumo dos valores obtidos nos ensaios de fadiga para uma extensão de 400 $\mu\epsilon$
- Quadro IV.13 Resumo dos valores obtidos nos ensaios de fadiga para uma extensão de 200 $\mu\epsilon$

Quadro IV.14 Valores dos parâmetros A e B e do coeficiente de correlação relativos à expressão da rigidez

Quadro IV.15 Valores dos parâmetros a e b e do coeficiente de correlação relativos à variação da rigidez das misturas betuminosas

Quadro IV.16 Valores dos parâmetros a e b e do coeficiente de correlação relativos às leis de fadiga

Quadro IV.17 Valores dos coeficientes A e z da expressão da energia dissipada acumulada e respectivos coeficientes de correlação

Quadro V.1 Parâmetros e coeficientes de correlação das leis de fadiga segundo os modelos da SHELL, AI e SHRP para a mistura betuminosa

Quadro V.2 Valores do número de ciclos de carga até à ruína, para uma extensão de tracção de $75,6 \times 10^{-6}$ $\mu\epsilon$, obtidos nos ensaios laboratoriais e por aplicação das expressões da SHELL, AI e SHRP

GLOSSÁRIO DOS SÍMBOLOS

a	Parâmetro da lei de fadiga, distância entre pontos de aplicação de carga
A	Parâmetro
b	Parâmetro da lei de fadiga, largura do provete
B	Parâmetro
BBR	Bending Beam Rheometer
BS	Norma Inglesa
C_v	Fracção ocupada pelo agregado e betume no volume total da mistura betuminosa
DSR	Dynamic Shear Rheometer
DTT	Direct Tension Test
E	Especificação LNEC
EN	Norma Europeia
E^*_b	Módulo de rigidez de um betume
E_{cb}	Componente elástica do módulo de rigidez de um betume
E^*_m	Rigidez de uma mistura betuminosa
E_{vb}	Componente viscosa do módulo de rigidez de um betume
E_{vm}	Componente viscosa do módulo de rigidez de uma mistura betuminosa
f	Frequência de carregamento
h	Altura do provete
i	Indicador, coeficiente
IP	Índice de penetração
k	Coeficiente
L	Comprimento

LVDT	Linear Variable Displacement Transformer
NF	Norma Francesa
n_i	Número de aplicações de carga
N_i	Número de aplicações de carga até à rotura
NP	Não plástico, norma portuguesa
N_f	Vida à fadiga de uma mistura betuminosa, número de ciclos de carga até à ruína de uma mistura betuminosa
prEN	Pré-norma Europeia
P	Força aplicada, penetração de um betume- resultado do ensaio de penetração
PAV	Pressure Aging Vessel
P_b	Percentagem ponderal de betume
R^2	Coefficiente de correlação
RTFOT	Rolling Thin Film Oven Test
RV	Rotational Viscometer
s	Atraso da extensão de tracção relativamente à tensão de tracção
S_f	Factor para conversão do resultado laboratorial em previsão no pavimento
SHRP	Strategic Highway Research Program
SUPERPAVE	Superior Performing Asphalt Pavements
t	Tempo, tempo de carregamento
T	Temperatura
T_{ab}	Temperatura anel e bola de uma mistura betuminosa - Resultado do ensaio de amolecimento
V	Velocidade
V_a	Percentagem volumétrica de agregado
V_b	Volume de betume na mistura, percentagem volumétrica de betume
VFB	Percentagem de vazios da mistura de agregados preenchidos com betume

VMA	Vazios da mistura de agregados
V_v	Porosidade da mistura betuminosa
W_{dafm}	Energia dissipada acumulada no ensaio de fadiga de uma mistura betuminosa
W_{dccb}	Energia dissipada por ciclo de carga no ensaio de fadiga de um betume
W_{dcfm}	Energia dissipada por ciclo de carga no ensaio de fadiga de uma mistura betuminosa
z	Parâmetro
ΔL	Variação de comprimento
ε	Valor de extensão
ε_{ca}	Valor da extensão de compressão admissível
ε_{cM}	Valor da extensão vertical de compressão máxima
ε_{tam}	Valor da extensão de tracção admissível na mistura betuminosa
ε_{tb}	Valor da extensão de tracção instalada num betume
ε_{tm}	Valor da extensão de tracção instalada numa mistura betuminosa
ε_{tMm}	Valor da extensão de tracção máxima na mistura betuminosa
ε_{t0b}	Valor da amplitude da extensão de tracção aplicada a um betume
ϕ_b	Ângulo de fase de um betume
ϕ_m	Ângulo de fase de uma mistura betuminosa
σ	Tensão
σ_{tb}	Valor da tensão de tracção instalada num betume
σ_{tm}	Valor da tensão de tracção instalada numa mistura betuminosa
σ_{t0b}	Valor da amplitude da tensão de tracção aplicada a um betume
δ	Deformação a meio vão do provete
ρ	Massa volúmica aparente da mistura betuminosa compactada

ν	Coefficiente de Poisson
ω	Frequência angular

ABREVIATURAS

AASHTO	American Association of State Highway and Transport Official (USA)
AI	Asphalt Institute (USA)
APORBET	Associação Portuguesa dos Industriais de Misturas Betuminosas
ASTM	American Society for Testing and Materials (USA)
CEN	Comité Européu de Normalização
CICCOPN	Centro de Formação Profissional da Industria da Construção Civil e Obras Públicas do Norte
LGMC	Laboratório de Geotecnia e Materiais de Construção
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil

CONSIDERAÇÕES INTRODUTÓRIAS

Os processos ligados aos fenómenos de fadiga das misturas betuminosas aplicadas nos pavimentos flexíveis são há já alguns anos, objecto de muita pesquisa e investigação em todo o mundo e principalmente na Europa, nos Estados Unidos da América e na Austrália.

Em Portugal já alguns investigadores se debruçaram sobre este assunto, trabalhos esses que deram origem a várias publicações e Teses de Mestrado e Doutoramento [1] [2] [3].

No entanto, apesar de todo o trabalho já desenvolvido, actualmente está a ser realizada grande pesquisa procurando estabelecer metodologias que permitam prever de uma forma muito realista o comportamento à fadiga dos materiais que constituem as camadas de um pavimento, ao longo da sua vida, tendo por base os resultados obtidos nos estudos laboratoriais de formulação desses materiais. Essas metodologias têm-se verificado difíceis de estabelecer devido a dois factores principais:

- O comportamento mecânico das misturas betuminosas é muito complexo, tornando difícil a sua previsão através da quantificação laboratorial das suas propriedades mecânicas. Acrescem os elevados custos, não só na aquisição dos equipamentos de medida, mas também na formação necessária à realização dos ensaios;
- As misturas betuminosas aplicadas nas camadas dos pavimentos flexíveis estão sujeitas a variações das acções com o tempo, de forma perfeitamente aleatória, e portanto difíceis de controlar em laboratório, obrigando a simplificações que por vezes não são confirmadas no pavimento.

Dos vários trabalhos realizados neste domínio em todo o Mundo, os mais recentes dizem respeito à intensa pesquisa realizada pela Associação Americana AASHTO, American Association of State Highway and Transportation. Em meados dos anos 80, esta Associação

deu início a um vasto e ambicioso programa de investigação, internacionalmente conhecido por programa SHRP, Strategic Highway Research Program, e que tinha como principal objectivo, desenvolver metodologias na área dos betumes e das misturas betuminosas, capazes de caracterizar as propriedades base dos materiais, ou seja, as propriedades directamente relacionadas com o comportamento das misturas betuminosas. O trabalho de investigação dividiu-se em três fases conforme os objectivos a atingir, definindo primeiramente as propriedades que deveriam ser medidas, desenvolvendo de seguida os ensaios para quantificar essas propriedades, estabelecendo por fim a forma como essas propriedades podem ser usadas na previsão do comportamento dos materiais colocados no pavimento. O programa SHRP só terminou na Primavera de 1993, com a publicação de metodologias inteiramente novas, com a designação geral de SUPERPAVE, Superior Performing Asphalt Pavements.

Este trabalho representa mais uma contribuição sobre esta matéria e pretende fazer a apresentação de um equipamento servopneumático, para a execução de ensaios de fadiga de misturas betuminosas, fruto de um programa de pesquisa desenvolvido na Austrália e que tem por base a metodologia desenvolvida no programa SHRP.

Complementarmente procura, com base nos resultados obtidos na parte experimental, apresentar as leis de fadiga de uma mistura betuminosa com agregados graníticos, típicos da região Norte do País, nomeadamente da região do Porto, e definir uma metodologia que permita, de forma necessariamente simplificada, mas eficaz, fazer o controlo de obra no que diz respeito a esta característica tão importante.

Deste modo o trabalho é apresentado em cinco capítulos:

CAPÍTULO I

A fadiga nos pavimentos betuminosos

A evolução das propriedades de uma mistura betuminosa colocada num pavimento é uma matéria de grande complexidade, uma vez que o seu comportamento é influenciado sempre que a mistura é solicitada, ou seja, quando uma nova acção é aplicada, seja ela mecânica ou térmica, o material passa a possuir características diferentes das que tinha antes da aplicação dessa acção, levando a que a resposta da mistura a um novo estímulo, seja

diferente de respostas anteriores. Este capítulo levanta esta questão, apresentando de forma breve, as causas que levam à ruína os pavimentos flexíveis, procurando evidenciar os processos de ruína associados ao efeito de fadiga. São aqui apresentadas igualmente, não só as várias características que condicionam a fadiga, mas também as leis que lhes estão associadas:

CAPÍTULO II

Os vários tipos de ensaios de fadiga

Apresentação dos vários ensaios para a determinação da vida à fadiga com particular incidência nos métodos de ensaio previstos na futura Norma Europeia.

São também descritas as vantagens e desvantagens geralmente associadas a cada um dos ensaios e sempre que possível, são feitas referências aos trabalhos de investigação entretanto realizados, na comparação dos resultados obtidos nos diferentes ensaios.

CAPÍTULO III

Procedimento do ensaio de flexão simples por carregamento em dois pontos em equipamento servopneumático

Descrição pormenorizada do equipamento servopneumático utilizado neste trabalho, bem como o método de ensaio, principais correlações, comportamento mecânico, adequabilidade e limitações associadas.

CAPÍTULO IV

Avaliação da vida à fadiga de uma mistura betuminosa

Apresentação do trabalho desenvolvido na execução dos ensaios de fadiga da mistura betuminosa em estudo, incluindo a caracterização dos materiais e da mistura betuminosa, todo

o processo de obtenção dos provetes e apresentação dos resultados dos ensaios de fadiga realizados.

CAPÍTULO V

Conclusões

A apresentação deste trabalho termina procurando, com base nos resultados obtidos na parte experimental, definir uma possível metodologia, que permita considerar esta propriedade no controlo de obra, para a grande generalidade das obras correntes. Essa metodologia deverá obviamente ser validada com o desenvolvimento do trabalho e a consequente obtenção de mais dados sobre esta matéria.

CAPÍTULO I

CAPÍTULO I

A FADIGA NOS PAVIMENTOS BETUMINOSOS

1.1 Introdução

A degradação estrutural dos pavimentos flexíveis está associada ao aparecimento das seguintes patologias: fendilhamento, deformações permanentes, desagregação superficial e migração de materiais nas camadas ou entre camadas.

Por outro lado, os estados de fendilhamento que ocorrem nas camadas ligadas com betume podem ser devidos a diversos factores:

- Inadequabilidade dos materiais face às acções a que o pavimento está sujeito;
- Deficiências na execução dos trabalhos;
- Variações térmicas;
- Fenómenos de fadiga.

Os dois primeiros factores podem ser evitados, ou pelo menos minimizada a sua ocorrência, se forem consideradas metodologias ligadas aos processos da qualidade em todas as fases da obra, nomeadamente em fase de projecto e em fase de execução, no controlo dos produtos e dos processos de fabrico e na verificação da conformidade.

Por outro lado, o clima temperado que se faz sentir no nosso país, não se verificando, salvo raras excepções, como por exemplo no Nordeste Transmontano ou no interior Alentejano, temperaturas muito baixas nem variações térmicas muito importantes, faz com que o efeito das acções térmicas nos nossos pavimentos não se faça sentir de forma significativa.

Assim poder-se-á dizer que o fendilhamento dos pavimentos betuminosos portugueses está fundamentalmente associado a fenómenos de fadiga.

A resistência à fadiga de uma mistura betuminosa pode ser definida como sendo a capacidade que esse material possui de responder à aplicação repetida de cargas provenientes do tráfego, para determinadas condições de velocidade de tráfego e ambientais,

nomeadamente em termos de temperatura, sem atingir a rotura. Como ficará dito neste capítulo um pouco mais adiante, o conceito de rotura dos provetes nos ensaios de fadiga não implica necessariamente o total fendilhamento da mistura betuminosa, devendo considerar-se a ocorrência da rotura do provete quando a mistura que o constitui atingir valores residuais para as suas características mecânicas, nomeadamente o módulo de rigidez, que conduzam a um comportamento mecânico inadequado, mesmo que ainda não se tenha verificado o total fendilhamento do provete.

1.2 Dimensionamento dos pavimentos flexíveis

O dimensionamento de pavimentos flexíveis tem evoluído de modo muito significativo especialmente nas duas últimas décadas. Desde 1920 é reconhecida a extrema importância de dois parâmetros das misturas betuminosas: o volume de vazios da mistura e os vazios da mistura de agregados. Os métodos de cálculo desenvolvidos por Hubbard Field, na época da 1ª Grande Guerra e por Marshall e Hveem nas décadas de 30 e 40, e que ainda hoje são utilizados com algumas melhorias, têm por base propriedades volumétricas associadas à determinação de uma propriedade mecânica do tipo empírico. Tratam-se pois de métodos baseados em propriedades empíricas que, uma vez controladas, conduzem a formulações de misturas com grande probabilidade de apresentarem um bom comportamento no pavimento.

Desde então verifica-se intensa investigação no sentido de quantificar laboratorialmente as propriedades fundamentais, não só dos materiais em presença, betume e agregado, mas também das misturas betuminosas, e correlacioná-las com o comportamento dos materiais no pavimento. Essa investigação centrou-se inicialmente no estudo do comportamento ao corte das misturas betuminosas, com recurso aos equipamentos utilizados na geotecnia nos ensaios de corte e triaxiais de solos [4]. As misturas betuminosas eram então consideradas como constituindo um sistema trifásico parcialmente saturado ou praticamente saturado análogo a um solo. No entanto esta aproximação veio a revelar-se grosseira uma vez que o betume é bem mais viscoso do que a água, nomeadamente para as gamas de temperatura de serviço, e as partículas constituintes do agregado possuem dimensões superiores às partículas dos solos ensaiados por aqueles métodos.

Nos nossos dias, após o aperfeiçoamento de técnicas laboratoriais, é já possível quantificar de forma bastante precisa, as principais características mecânicas das misturas e,

face aos resultados obtidos nos ensaios, prever o seu comportamento uma vez colocada no pavimento.

Desta forma o dimensionamento de pavimentos é actualmente realizado com base em metodologias racionais que incluem o estudo do comportamento da estrutura sob dois aspectos distintos [2]:

- comportamento funcional;
- comportamento estrutural.

O dimensionamento funcional de um pavimento consiste em, considerando as solicitações a que vai estar sujeito, dotar o pavimento de condições adequadas em termos de segurança e conforto. Estão relacionados com a segurança e o conforto aspectos como a comodidade, visibilidade, aderência, insonorização, drenagem e resistência ao rolamento.

O dimensionamento estrutural de um pavimento flexível tem como finalidade a definição de uma estrutura de múltiplas camadas, respectivas espessuras e características mecânicas dos materiais que as constituem, capaz de resistir ao tráfego e às condições climáticas sem sofrer degradações, em termos de fissuração e deformações, que ponha em risco determinado nível de funcionalidade durante a vida de projecto do pavimento [3].

Actualmente verifica-se uma tendência de especialização das camadas, reservando as características de funcionalidade para a camada de desgaste, com utilização de camadas delgadas e mesmo muito delgadas que chegam a atingir espessuras de apenas 1,5 cm, assumindo as camadas de base e de fundação exclusivamente a função estrutural. É pois nos materiais de base ligados com betume que a avaliação do seu comportamento à fadiga se torna mais importante.

O dimensionamento estrutural de pavimentos flexíveis é realizado através de métodos analíticos que consistem em comparar, para as diferentes camadas do pavimento e para o leito do pavimento, as extensões obtidas pela acção do eixo padrão e os valores admissíveis definidos por critérios de ruína, traduzidos por leis de fadiga e deformações permanentes. Quer isto dizer que a fissuração por fadiga devida às tensões repetidamente instaladas pelo tráfego e a formação de cavados de rodeira, constituem os parâmetros mais importantes no dimensionamento estrutural do pavimento.

Estes dois fenómenos devem ser limitados o mais possível uma vez que o seu aparecimento acelera, de forma muito significativa, a ruína do pavimento.

Resumidamente o cálculo estrutural de um pavimento consiste pois em [5]:

- Calcular o valor da extensão vertical de compressão máxima (ϵ_{cM}) no topo da camada de leito do pavimento e garantir que seja inferior a um dado valor, dado pelo critério de dimensionamento estabelecido, de modo a limitar a ocorrência de deformações permanentes;
- Calcular os valores das extensões horizontais máximas de tracção na base das diferentes camadas betuminosas (ϵ_{t1Mm} e ϵ_{t2Mm}) e garantir que sejam inferiores a determinado valor, dado pelo critério de dimensionamento estabelecido, de modo a limitar a ocorrência de fendilhamento por fadiga (fig.1.1).

Problemas de fadiga num pavimento começam a notar-se com o aparecimento de fendas irregulares com direcção longitudinal, preponderante, e localizadas geralmente na zona de passagem dos rodados dos veículos pesados. Essas pequenas fendas, no entanto, rapidamente evoluem para estados de fendilhação do tipo pele de crocodilo [6], uma vez que o aparecimento das primeiras fendas originam:

- entrada de água nas camadas do pavimento, nomeadamente nos materiais granulares constituintes das camadas de base e solos das camadas de fundação. A este facto está geralmente associada uma redução da resistência mecânica dessas camadas e um possível assentamento que origina a deformação de todo o pavimento;
- concentração de tensões devido ao efeito de bordo que se verifica marginalmente à fenda;
- perda de elementos finos das camadas de base e fundação, por efeitos de bombagem e consequente redução da resistência mecânica desses materiais;

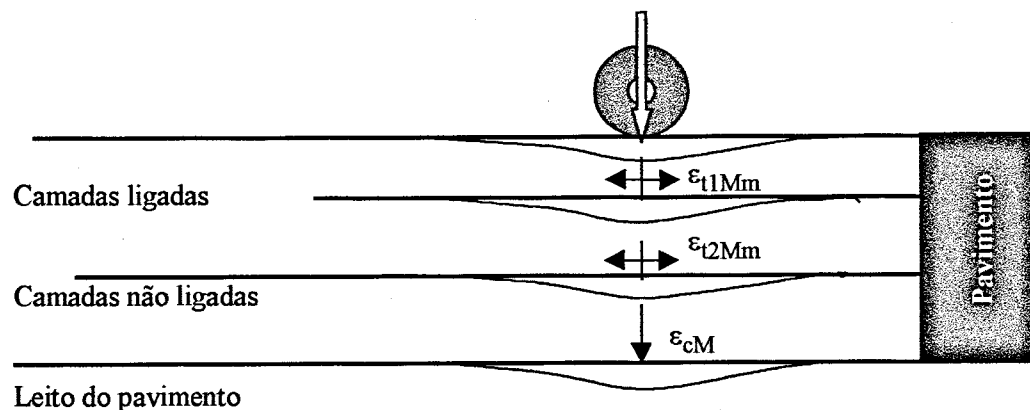


Fig. 1.1 Extensões consideradas no cálculo dos pavimentos flexíveis

- aumento dos efeitos de vibração dos veículos pesados que levam à introdução de cargas dinâmicas excessivas.

Por outro lado a formação de cavados de rodeira conduzem:

- variações da regularidade transversal da superfície de rolamento que por sua vez originam instabilidade na condução devida às vibrações;
- os condutores tem tendência a mudar de trajectória, colocando-se problemas de segurança;
- dificulta o rápido escoamento transversal das águas superficiais colocando problemas de hidroplanagem;
- concentração de tensões devido ao efeito de bordo;
- agravamento das pressões aplicadas pelos rodados devido à diminuição da área de contacto com o pavimento;

- desenvolvimento de cargas dinâmicas excessivas.

As diferentes etapas seguidas no dimensionamento dos pavimentos através de métodos analíticos encontram-se evidenciadas no fluxograma apresentado na figura 1.2 [2].

Como se viu o método de cálculo utilizado no dimensionamento estrutural de pavimentos prevê a definição de valores para algumas características das misturas das diferentes camadas, como a rigidez e o coeficiente de Poisson e estabelecem-se, através de critérios de dimensionamento, os comportamentos à fadiga e às deformações permanentes dos materiais do pavimento.

No entanto, em obra, a definição da composição volumétrica das misturas betuminosas é realizada com base em métodos empíricos, como o método Marshall do qual não consta a determinação dos valores da rigidez, fadiga e formação de rodeiras para confirmação dos valores atribuídos em fase de projecto.

Por outro lado, para muitas outras estruturas da engenharia, como por exemplo as estruturas de betão, são dimensionadas definindo algumas características desse material, nomeadamente a sua resistência mecânica, em termos de propriedades fundamentais, para depois em obra a composição do betão ser estudada e definida com base na realização de ensaios onde se avalia essa resistência mecânica.

Parece pois ser fundamental que o controlo da qualidade das misturas betuminosas seja realizado, à semelhança de outros materiais empregues na construção, através de ensaios laboratoriais que quantifiquem o comportamento da mistura em termos de fadiga e deformações permanentes, por forma a garantir que o comportamento da mistura betuminosa colocada em obra se assemelha ao comportamento definido em fase de dimensionamento.

De outra forma continuará a observar-se desvios importantes entre o projecto e a obra que tornam o cálculo estrutural e os modelos a ele associados pouco representativos e sem significado. Na prática este aspecto poderá traduzir-se numa diminuição drástica da vida do pavimento, verificando-se em grande parte das obras que o período de vida do projecto de 20 anos representa apenas um valor base para o cálculo estrutural, não correspondendo à real durabilidade da obra.

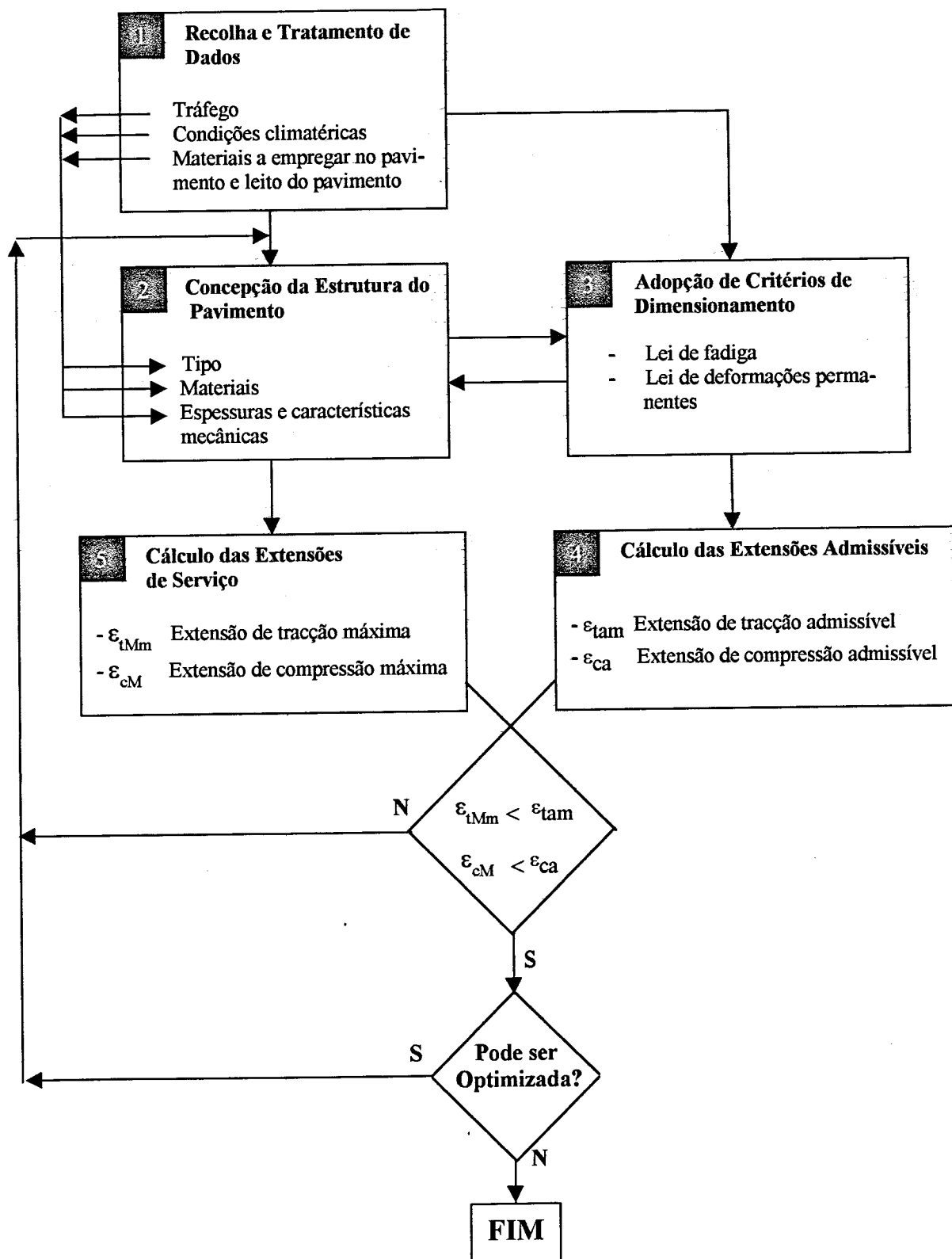


Fig. 1.2 Fluxograma do dimensionamento estrutural de um pavimento flexível

1.3 Comportamento de um mistura betuminosa à fadiga

As misturas betuminosas são materiais que se obtêm basicamente apela adição e homogeneização de dois componentes básicos, agregados e betume, constituindo o filler o terceiro componente para a maior parte das misturas betuminosas utilizadas em Portugal. Recentemente tem-se vindo a verificar, a exemplo do que acontece já em larga escala nos outros países da Europa, a reciclagem de pavimentos usados, passando o fabrico das misturas betuminosas a incluir o material fresado que substitui na mistura não só parte do agregado mas também parte do betume, conseguindo-se assim importantes ganhos em termos económicos e ambientais.

Pode pois dizer-se que as características de resistência à fadiga de uma mistura betuminosa dependem fortemente das características dos seus constituintes e da sua distribuição volumétrica na mistura. Factores como o tráfego, a temperatura e a compactação da mistura são também responsáveis, por variações importantes no comportamento à fadiga das misturas betuminosas.

1.3.1 Betumes

1.3.1.1 Comportamento

Os betumes, obtidos da refinação do crude, são materiais de reologia algo complexa pois o seu comportamento é fortemente condicionado por dois factores: temperatura e tempo de carregamento.

Apresentam características idênticas a materiais elásticos para baixas temperaturas e para curtos tempos de carregamento (tráfego de elevada velocidade) e comportamento viscoso para elevadas temperaturas e longo tempo de carregamento (por exemplo zonas de estacionamento). Para temperaturas ou tempo de carregamento intermédios o seu comportamento é do tipo viscoelástico com características mecânicas difíceis de estabelecer.

Por outro lado os efeitos provocados no betume pela temperatura e pelo tempo de carregamento estão relacionados, quer isto dizer que, determinado comportamento a

elevada temperatura durante um pequeno período de tempo pode ser igualmente verificado a baixa temperatura para elevado período de tempo de carregamento.

Para as temperaturas verificadas no nosso País podemos dizer que os betumes aplicados nos pavimentos se comportam de forma viscoelástica. O comportamento viscoelástico de um betume pode ser definido pelo efeito simultâneo de uma mola que representa a fase elástica e um amortecedor que simula o comportamento viscoso.

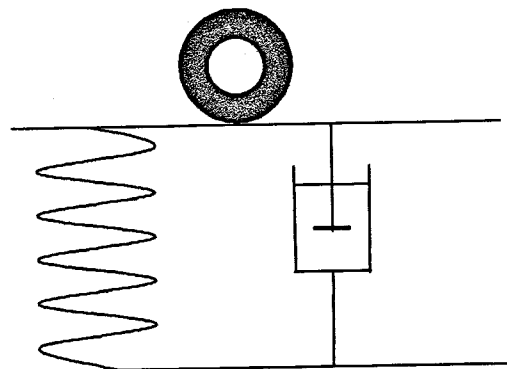


Fig. 1.3 Modelo do comportamento viscoelástico de uma mistura betuminosa

Se reportarmos este comportamento para a mistura betuminosa colocada numa camada de um pavimento (fig.1.3), facilmente se concluirá que a acção de uma carga à superfície provoca uma reacção simultânea na mola e no amortecedor, sofrendo a mola uma deformação elástica instantânea, correspondente ao agregado e à fase elástica do betume e o amortecedor uma deformação que se prolonga ao longo de todo o tempo de carregamento correspondente à reacção viscosa do betume.

A figura 1.4 esquematiza em gráfico a distribuição das deformações sofridas por uma mistura betuminosa sujeita a um ensaio de fluência realizado por aplicação de uma carga estática e constante entre os instantes t_1 e t_2 . A mistura sofre uma deformação total (GI) que pode ser dividida em duas parcelas GH e HI. A primeira diz respeito à componente elástica e instantânea devida ao comportamento elástico do betume e agregado e é representada no gráfico pelo segmento AB. A segunda parcela, devida ao comportamento viscoso do betume, verifica-se ao longo de todo o tempo de carregamento e é representada pela curva BC. Na descarga verifica-se que parte da deformação elástica sofrida na carga é recuperada de forma instantânea (CD). A restante deformação elástica e a deformação correspondente ao comportamento viscoso será recuperada apenas em parte (KL), verificando-se uma deformação permanente residual (JK). A parcela de deformação elástica recuperada instantaneamente na descarga é tanto maior quanto maior for o valor da rigidez da mistura betuminosa.

Para além deste complexo comportamento devemos ainda considerar o envelhecimento do betume, com o consequente aumento da sua viscosidade, que se verifica em dois estádios da vida do betume:

- no processo de fabrico das misturas betuminosas onde se verifica a volatilização dos componentes aromáticos constituintes do betume devido às elevadas temperaturas na mistura e a oxidação devida a reacções entre o betume e o oxigénio da atmosfera;
- após a colocação da mistura na camada verificando-se o envelhecimento do betume quase exclusivamente por oxidação, devida ao oxigénio da água das chuvas e do ar, uma vez que as temperaturas instaladas nos pavimentos não são suficientemente elevadas para que se verifique perda significativa dos constituintes mais voláteis do betume.

O progressivo aumento da viscosidade do betume com o tempo é tanto maior quanto maior a temperatura ambiente, a velocidade dos ventos, a agressividade do tráfego, a pluviosidade, a radiação solar e a porosidade da mistura. Por outro lado esse aumento da viscosidade do betume traduz-se num aumento da rigidez e consequente fragilização da mistura betuminosa, implicando a alteração das características de comportamento da mistura com o tempo.

Assim, o comportamento de um betume não pode ser avaliado através de uma única característica, sendo usual a caracterização do betume a altas temperaturas através da sua viscosidade e para baixas temperaturas através da sua rigidez. O comportamento viscoso a altas temperaturas apenas interessa conhecer em fase construtiva por forma a definir as temperaturas mais adequadas para realizar as operações de mistura com os agregados e compactação das misturas, pelo que não serão referidas neste trabalho.

Trataremos assim neste ponto apenas do comportamento elástico do betume e de que forma influência o comportamento à fadiga da mistura betuminosa.

1.3.1.2 Módulo de rigidez

Dado o comportamento não elástico do betume, o valor do quociente entre a tensão e a extensão não é constante pelo que não toma, a exemplo dos materiais elásticos, a designação

de módulo de elasticidade passando a designar-se por módulo complexo, módulo de rigidez ou simplesmente rigidez.

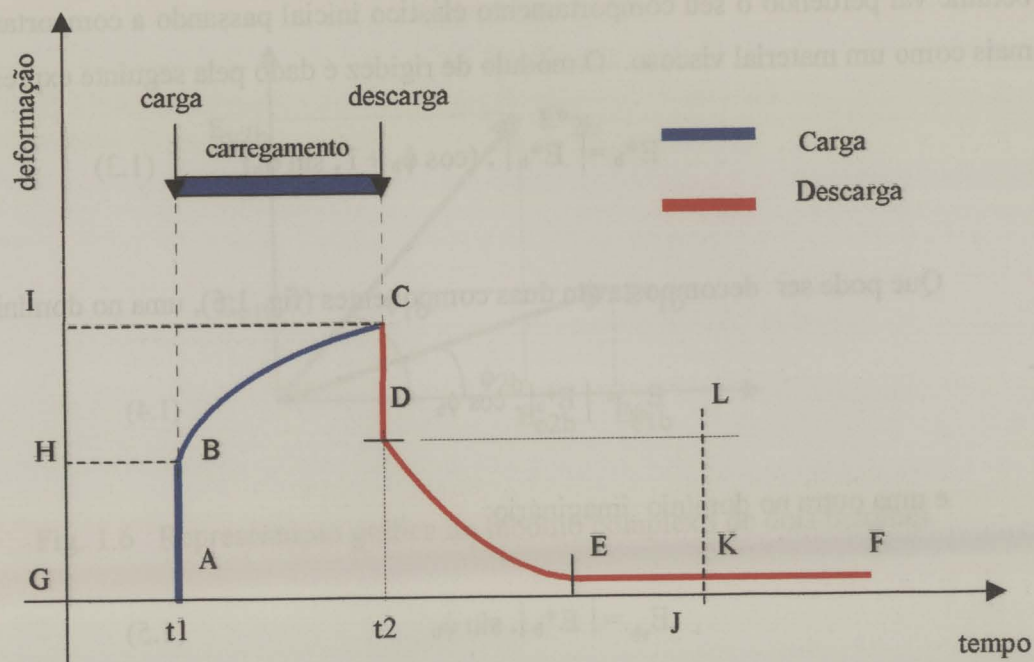


Fig. 1.4 Esquema das deformações observadas num ensaio de fluência de uma mistura betuminosa

O módulo de rigidez de um betume não é um valor único não sendo pois uma característica intrínseca desse betume. O seu valor depende fundamentalmente de três factores: tempo de carregamento, temperatura e forma de carregamento. Assim, o valor da rigidez deve vir sempre acompanhado do método de ensaio utilizado, da temperatura de ensaio e condições de carregamento.

Se aplicarmos um carregamento sinusoidal do tipo:

$$\sigma_{tb} = \sigma_{tob} \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (1.1)$$

O betume deforma-se com um certo atraso mas com a mesma frequência, devido ao seu comportamento viscoelástico:

$$\epsilon_{tb} = \epsilon_{tob} \cdot \sin(\omega \cdot t - \phi_b) \quad (1.2)$$

Ao ângulo ϕ_b dá-se o nome de ângulo de fase do betume. O valor do ângulo de fase é tanto maior quanto mais o betume se aproxima de um comportamento viscoso. O ângulo de fase varia de forma crescente, de 0 a 90°, com o número de aplicações de carga uma vez que o betume vai perdendo o seu comportamento elástico inicial passando a comportar-se cada vez mais como um material viscoso. O módulo de rigidez é dado pela seguinte expressão:

$$E^*_b = |E^*_b| \cdot (\cos \phi_b + i \cdot \sin \phi_b) \quad (1.3)$$

Que pode ser decomposta em duas componentes (fig. 1.5), uma no domínio real:

$$E_{eb} = |E^*_b| \cdot \cos \phi_b \quad (1.4)$$

e uma outra no domínio imaginário:

$$E_{vb} = |E^*_b| \cdot \sin \phi_b \quad (1.5)$$

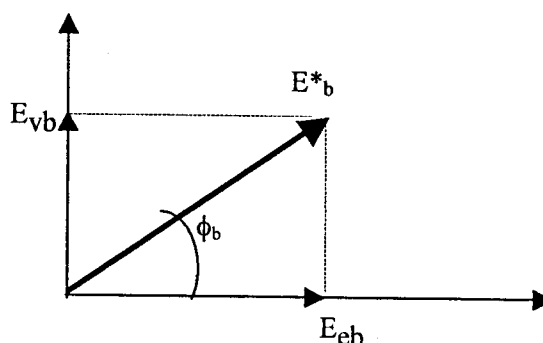


Fig.1.5 Módulo complexo de um betume

A primeira componente (E_{eb}), correspondente ao comportamento elástico do betume, representa a energia armazenada pelo material durante o carregamento e que é libertada depois com a descarga, enquanto que a segunda componente (E_{vb}), correspondente ao comportamento viscoso, está relacionada com a energia dissipada por atrito interno.

O esquema representado na figura 1.6 demonstra como o conhecimento apenas do valor da rigidez do betume é insuficiente para conhecer o seu comportamento em termos de deformação como resposta a uma solicitação. Na figura os betumes 1 e 2 apresentam a mesma

rigidez ($E^*_{1b} = E^*_{2b}$). No entanto o betume 1 é mais elástico do que o betume 2 dado que o seu ângulo de fase é menor, pelo que apresenta uma maior componente elástica relativamente ao betume 2. Assim torna-se necessário conhecer igualmente o ângulo de fase do betume.

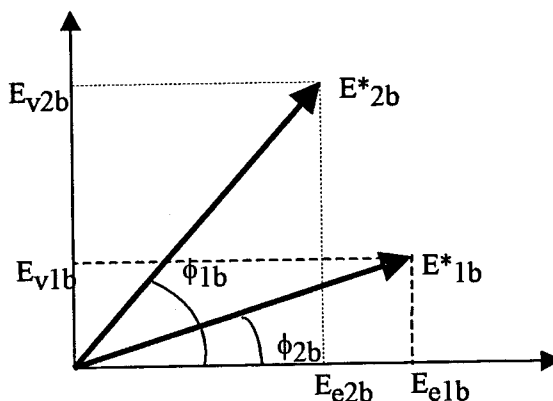


Fig. 1.6 Representação gráfica do módulo complexo de dois betumes

A rigidez de um betume deve ser quantificada através de ensaios laboratoriais, realizados em equipamentos apropriados, como por exemplo, com o reómetro de corte directo que será descrito um pouco mais adiante.

No entanto é possível prever, de forma necessariamente aproximada, o valor da rigidez de um betume por aplicação de fórmulas e ábacos, obtidos por vários investigadores por via experimental. Em alguns casos no entanto, os valores obtidos através dessas fórmulas, afastam-se significativamente do valor real, uma vez que essas expressões não entram em linha de conta com todos os factores que influenciam o módulo de rigidez.

Das expressões e ábacos existentes, o mais conhecido é (figura 1.7), sem dúvida, o nomograma de Van der Poel [7]. Neste ábaco o módulo de rigidez é obtido, para determinado tempo de carregamento e temperatura, através do conhecimento da temperatura de amolecimento anel e bola e do índice de penetração do betume. O índice de penetração de um betume (IP), constitui um parâmetro que define em parte o comportamento do betume, e é obtido através do conhecimento da penetração do betume para duas temperaturas diferentes, ou através da expressão (1.6):

$$IP = (1951 - 500 \cdot \log P - 20 \cdot T_{ab}) / (50 \cdot \log P - T_{ab} - 120,1) \quad (1.6)$$

com:

P - valor da penetração sofrida pelo betume no ensaio de penetração para 100 g, 5 s e 25 °C [8];

T_{ab} - valor da temperatura observada no ensaio de anel e bola [9].

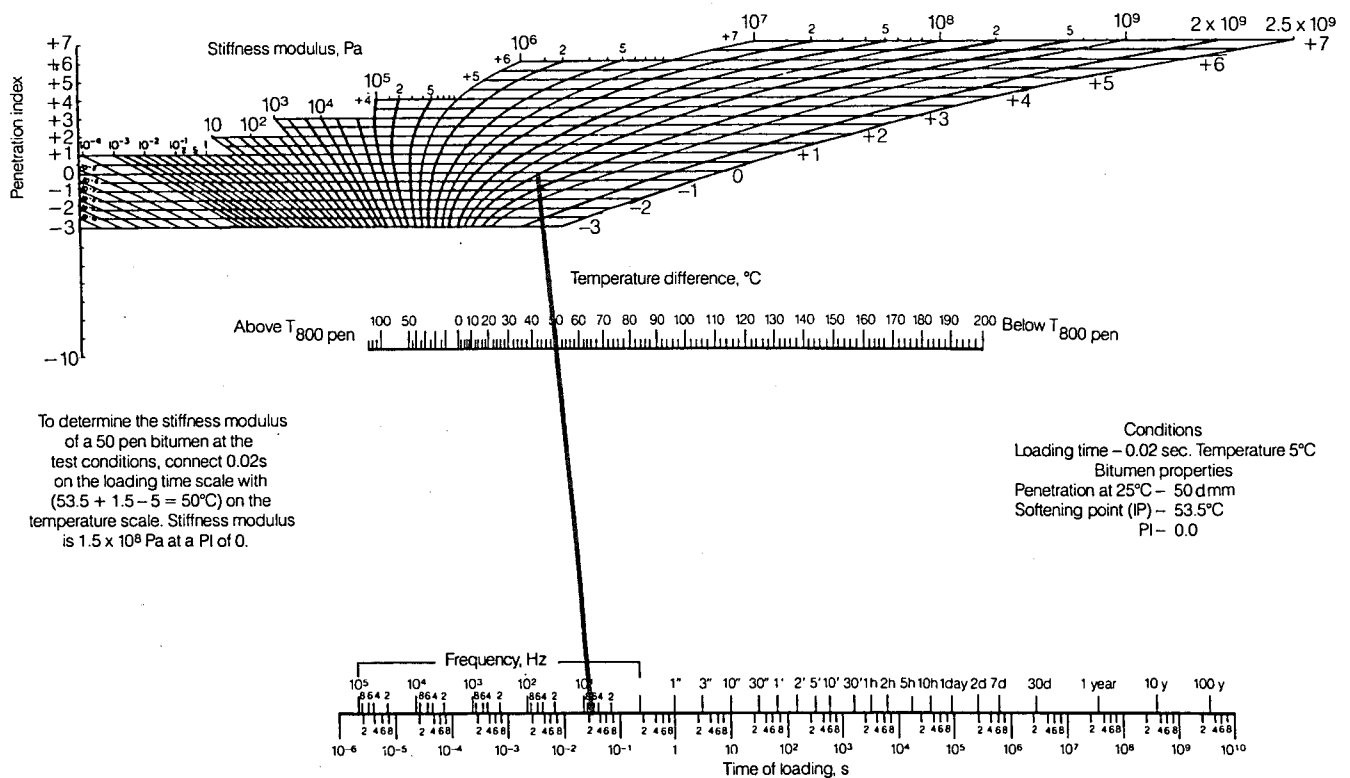


Fig. 1.7 Nomograma de Van der Poel

O valor do módulo de rigidez de um betume pode ser obtido, em alternativa ao diagrama de Van der Poel, através da expressão (1.7).

$$E_b^* = 1,157 \times 10^{-7} \cdot t^{0,368} \cdot 2,718^{IP} \cdot (T_{ab} - T)^5 \quad (1.7)$$

com:

- E_b^* - módulo de rigidez do betume, em Pa;
- t - tempo de carregamento, em segundos;
- T - temperatura do betume, em °C.

Esta expressão apresenta no entanto algumas limitações no seu uso [2], uma vez que apenas é válida para valores de IP entre -1 e +1, para valores de $(T_{ab} - T)$ compreendidos entre + 20 °C e + 60 °C e para valores do tempo de carregamento (t) entre 0,01 e 0,1 segundos.

1.3.1.3 Caracterização dos betumes

1.3.1.3.1 O caso Português

O comportamento dos betumes foi, durante um largo período de tempo, caracterizado através de ensaios puramente físicos ou químicos como a penetração, a temperatura anel e bola e a ductilidade. São ensaios do tipo empírico e que em nada reproduzem a reologia dos betumes e consequentemente o seu comportamento às temperaturas normais de serviço, principalmente no caso dos betumes modificados, sendo difícil concluir acerca do comportamento do betume apenas através dos resultados obtidos nesses ensaios.

As características dos betumes apresentavam-se definidas na Especificação LNEC E 80 de 1960. Recentemente a especificação foi revista, encontrando-se actualmente em vigor a edição de 1997. Esta edição apresenta algumas novidades relativamente à anterior, sendo as mais importantes as que se prendem com a necessidade de avaliar a viscosidade do betume definindo também a execução dos ensaios de penetração e temperatura de anel e bola após envelhecimento do betume em condições idênticas às que se verificam durante o fabrico da mistura betuminosa. As propriedades, métodos de ensaio, tipos de betumes e correspondentes exigências de conformidade encontram-se, como ficou dito, estabelecidas na Especificação do LNEC E 80/97 [10], apresentando-se resumidamente no Quadro I.1 essas características.

QUADRO I.1 Tipos de betume e exigências de conformidade

Propriedades	Tipos de betume							
	10/20	20/30	35/50	50/70	70/100	100/150	160/220	250/330
Penetração (25 °C, 100 g, 5 s) (0,1 mm)	10-20	20-30	35-50	50-70	70-100	100-150	160-220	250-330
Temperatura amolecimento (°C)	63-76	55-63	50-58	46-54	43-51	39-47	35-43	30-38
Viscosidade cinemática (mm ² /s)	1000	530	370	295	230	175	135	100
Solubilidade em tolueno ou xileno (%)	99	99	99	99	99	99	99	99
Temperatura de inflamação (°C)	250	240	240	230	230	230	220	220
Variação máxima de massa após RTFOT (%)	0,5	0,5	0,5	0,5	0,8	0,8	1,0	1,0
Penetração mínima após RTFOT (% do betume original)	60	55	53	50	46	43	37	35
Temperatura de amolecimento mínima após RTFOT (°C)	65	57	52	48	45	41	37	32
Aumento máx. da temperatura de amolecimento após RTFOT (°C)	8	10	11	11	11	12	12	12

Estes ensaios porém apresentam várias limitações das quais podem ser salientadas as seguintes [11]:

- Ensaios como o de penetração e anel e bola são ensaios do tipo empírico pelo que os resultados neles obtidos não podem ser directamente relacionáveis com o comportamento do betume nas misturas betuminosas no pavimento. As relações entre os resultados obtidos e o desempenho das misturas betuminosas foram sendo estabelecidas com a experiência.
- Os ensaios são realizados para determinado valor de temperatura, fixado na norma, não tendo pois em consideração os diferentes valores de temperatura definidos no dimensionamento, que por sua vez são considerados em função do local onde o pavimento vai ser executado.
- Os ensaios não consideram os diferentes comportamentos que o betume apresenta para as várias gamas de temperaturas de serviço no pavimento.

- Apesar desta nova edição da E 80 prever já o envelhecimento que o betume verifica na fase construtiva, não contempla no entanto o envelhecimento sofrido a longo prazo, durante o serviço.
- Betumes com comportamentos idênticos para as temperaturas de ensaio, por exemplo, 25° C no ensaio de penetração e 60° C no ensaio de viscosidade cinemática, podem apresentar comportamento bem distinto, para outras gamas de temperaturas.
- As normas de ensaio e as especificações do produto foram desenvolvidas com base na experiência acumulada ao longo dos anos, no que diz respeito aos betumes obtidos por destilação directa do crude, não sendo válidas para os betumes modificados, ou outros que não os tradicionais.

1.3.1.3.2 A metodologia SHRP

Por todas estas limitações, técnicos dos EUA, através do programa SHRP, desenvolveram uma nova metodologia para a caracterização dos betumes, procurando estabelecer ensaios que permitam definir correctamente as características mecânicas para uma vasta gama de temperaturas e para todos os tipos de betumes, incluindo os betumes modificados. Essa nova metodologia encontra-se descrita no estudo SUPERPAVE [12][13], onde se definem novos equipamentos e ensaios, que permitem a caracterização dos betumes para todas as gamas de temperatura. No quadro I.2 são inumerados os equipamentos de ensaio e definidos os objectivos a atingir com cada um deles.

A - ENSAIO RTFOT (ROLLING THIN FILM OVEN TEST)

O ensaio RTFOT (figura 1.8), para além de permitir prever o envelhecimento que o betume experimentará durante o processo construtivo (fabrico da mistura e sua colocação no pavimento), através da perda de massa verificada durante o ensaio, correspondente à perda dos constituintes voláteis do betume, permite igualmente a obtenção de uma amostra de betume para a realização de outros ensaios de caracterização.

Quadro I.2 Ensaios sobre betumes preconizados na metodologia SUPERPAVE

EQUIPAMENTO	OBJECTIVO	PROPRIEDADES DO BETUME
Estufa de Envelhecimento RTFOT	Simula o envelhecimento que ocorre durante o processo de fabrico	Resistência ao envelhecimento (durabilidade) durante a construção
Vaso de envelhecimento pressurizado (PAV)	Simula o envelhecimento do betume em serviço colocado no pavimento	Resistência ao envelhecimento (durabilidade) em serviço
Reómetro de corte dinâmico (DSR)	Define as propriedades do betume para as temperaturas em serviço, elevadas e intermédias	Resistência às deformações permanentes e ao fendilhamento por fadiga
Viscosímetro Rotativo (RV)	Define as propriedades do betume para temperaturas elevadas que ocorrem no processo construtivo	Manuseamento e bombagem
Ensaio de flexão em viga (BBR)	Define as propriedades do betume para baixas temperaturas de serviço	Resistência ao fendilhamento devido a baixas temperaturas
Ensaio de tracção Directa (DTT)	Define as propriedades do betume para baixas temperaturas de serviço	Resistência ao fendilhamento devido a baixas temperaturas

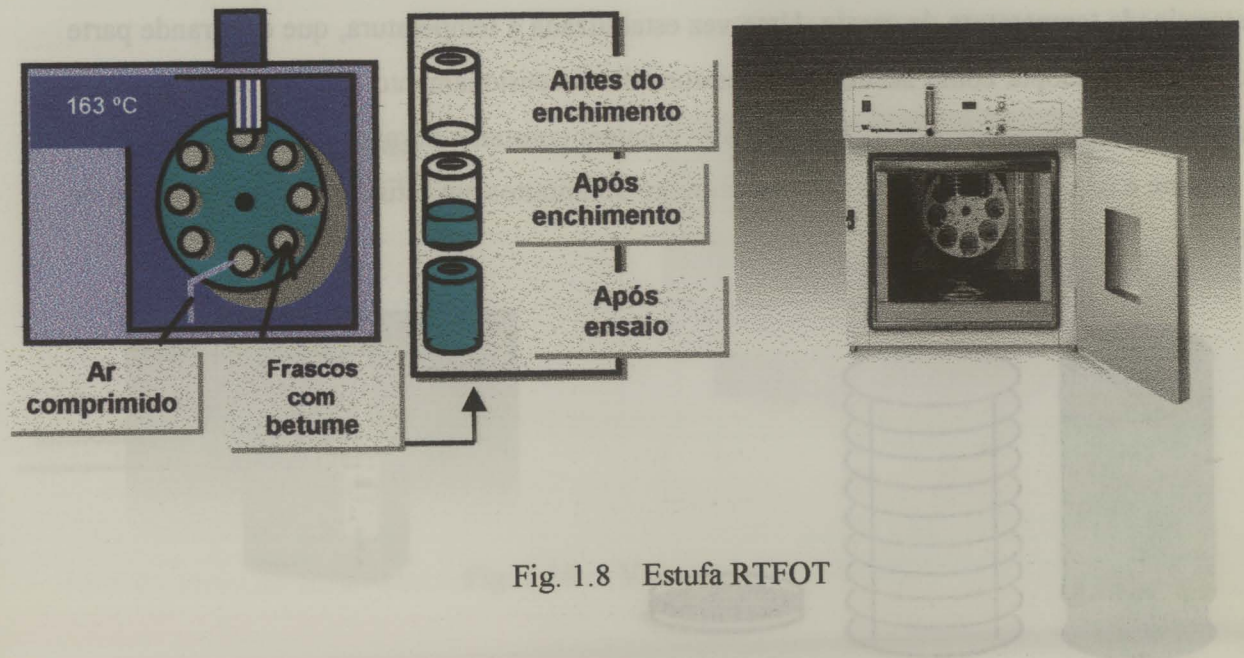


Fig. 1.8 Estufa RTFOT

B - ENSAIO PAV (PRESSURE AGING VESSEL)

O equipamento designado por PAV, câmara de envelhecimento pressurizada (figura 1.9), foi desenvolvido durante o programa SHRP, por forma a simular o envelhecimento do betume constituinte da camada do pavimento, que ocorrerá em serviço durante um período entre 5 e 10 anos. A exposição a elevadas pressões, simula melhor o envelhecimento do betume, relativamente a outros métodos de envelhecimento acelerado, como por exemplo aqueles que têm por base a exposição do betume a elevadas temperaturas. As vantagens associadas aquele método são as seguintes:

- Limita a perda de voláteis, pelo que se torna mais representativo das condições em serviço;
- Os processos de oxidação são acelerados, sem no entanto recorrer a temperaturas muito elevadas;
- Obtém-se, de uma só vez, uma quantidade de amostra adequada à realização de vários ensaios de caracterização;
- A técnica de ensaio é muito simples, aspecto que permite ponderar a sua adopção na caracterização dos betumes de forma continuada.

O ensaio consiste em colocar uma amostra de betume, após ensaio RTFOT, no interior da câmara, que por sua vez é colocada no interior de uma estufa de forma a garantir determinada temperatura de ensaio. Uma vez estabilizada a temperatura, que em grande parte dos casos se adopta como sendo a temperatura de dimensionamento da mistura da camada, aplica-se uma pressão de 2 070 MPa , que se mantém constante durante 20 horas. De seguida o betume é retirado da câmara e mantido durante 30 minutos em estufa a uma temperatura de 163°C.

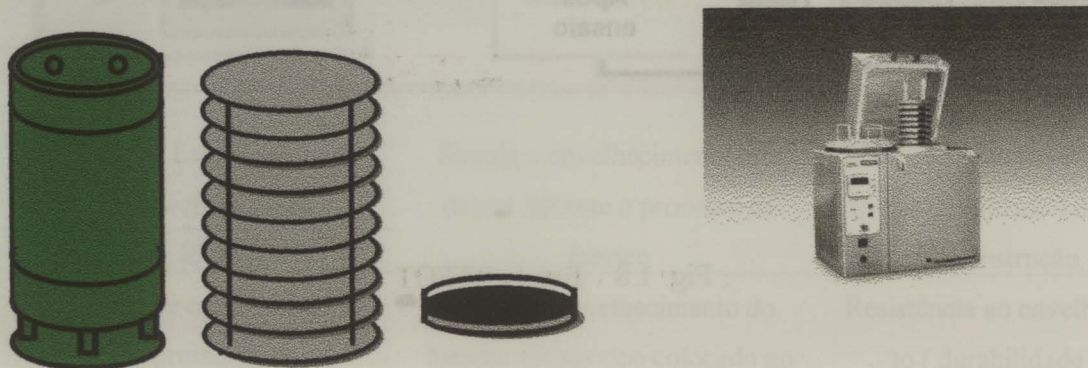


Fig 1.9 Câmara de envelhecimento pressurizada

C - ENSAIO RV (ROTATIONAL VISCOMETER)

O viscosímetro rotativo foi adoptado pelo SUPERPAVE para a determinação da viscosidade do betume a elevadas temperaturas, acima dos 100 °C, por forma a averiguar se o betume apresenta, a essas temperaturas, uma viscosidade adequada, permitindo não só as operações de bombagem, mas também o bom envolvimento dos agregados durante o fabrico da mistura.

Os betumes quando sujeitos a elevadas temperaturas, como acontece no processo de fabrico das misturas betuminosas, apresentam um comportamento puramente viscoso, do tipo Newtoniano, verificando-se que o estado de extensão instalado é independente do nível de tensão. Na prática este aspecto permite-nos averiguar a trabalhabilidade de um betume apenas através da sua viscosidade.

No ensaio RV, a viscosidade do betume é quantificada através do esforço de torção necessário realizar no eixo da lâmina do viscosímetro (figura 1.10), por forma a manter constante a velocidade de rotação de 20 rotações por minuto.

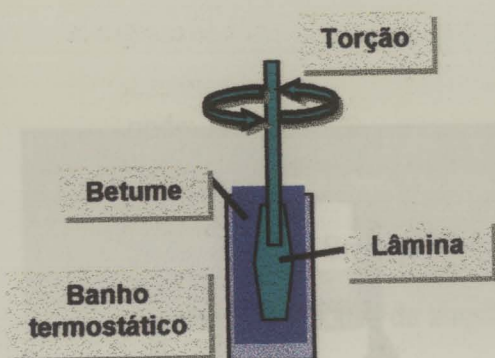


Fig. 1.10 Viscosímetro rotativo

D - ENSAIO DSR (DYNAMIC SHEAR RHEOMETER)

O reómetro de corte directo (DSR) é usado para caracterizar o comportamento visco-elástico do betume permitindo a obtenção quer da componente elástica quer da componente viscosa (figura 1.5), através da quantificação do módulo complexo (E^*_b) e o ângulo de fase (ϕ_b) do betume para determinada temperatura e frequência. O equipamento é usado para medir as propriedades dos betumes em serviço, para uma gama de temperaturas médias e elevadas, ou seja, do tipo das verificadas no nosso País.

O procedimento de ensaio é muito simples e consiste na colocação de uma amostra de betume entre os dois pratos do reómetro (figura 1.11), sendo o inferior fixo e o superior móvel com capacidade de rodar segundo o seu eixo vertical.

Quando é aplicado um esforço de torção ao prato superior, ele desloca-se desde o ponto A até ao ponto B. De seguida inverte-se o sentido de rotação em direcção a C, passando por A. O período fica completo com nova inversão do movimento de torção que leva o prato de novo ao ponto A. A norma prevê a execução do ensaio em tensão constante a uma frequência de 10 radianos por segundo, ou seja, cerca de 1,59 Hz.

Os ensaios são realizados para o betume em diferentes estados de envelhecimento:

- Sem envelhecimento, ou seja, sobre uma amostra de betume original;
- Após envelhecimento em RTFOT;
- Após envelhecimento em PAV.

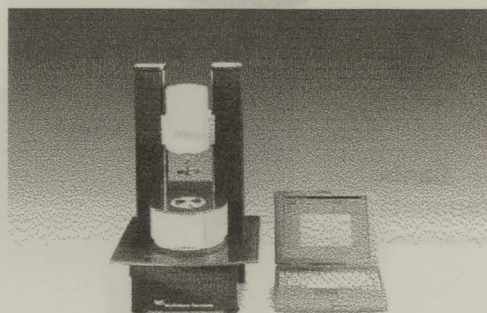
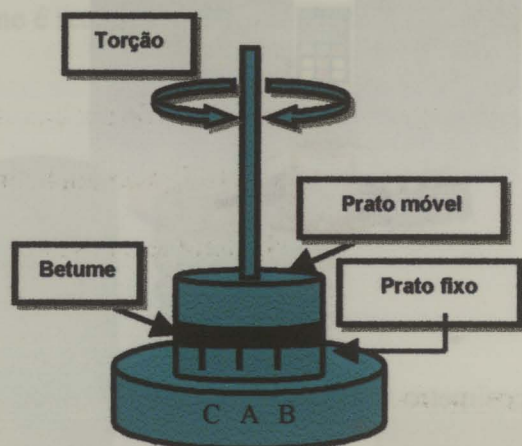


Fig. 1.11 Reómetro de corte

O betume existente numa mistura betuminosa, logo após a execução da camada do pavimento, apresenta uma determinada rigidez que vai aumentando com o tempo devido a fenómenos de oxidação do betume. Este é o motivo pelo qual, os problemas de deformações permanentes das misturas betuminosas, se colocam muito cedo, quando a rigidez da mistura é menor. À medida que o betume vai oxidando, a sua rigidez vai aumentando, verificando-se assim menores deformações para os mesmos estados de tensão, pelo que os problemas ligados à fadiga do material se tornam agora mais críticos.

Assim, os ensaios realizados com betumes sem envelhecimento e com betumes após RTFOT, procuram avaliar a adequabilidade do betume em termos de deformações permanentes, enquanto que os ensaios efectuados com betumes após PAV pretendem caracterizar o betume em termos de resistência à fadiga.

O comportamento do betume em termos de resistência às deformações permanentes e à fadiga pode ser traduzido matematicamente através das expressões (1.8) e (1.9) respectivamente.

$$W_{dccb} = \pi \times \sigma_{t0b}^2 \cdot [1 / (E^*_b / \sin \phi_b)] \quad (1.8)$$

$$W_{dcfb} = \pi \times \sigma_{t0b}^2 \cdot (E^*_b \cdot \sin \phi_b) \quad (1.9)$$

onde:

W_{dccb} - Energia dissipada por ciclo de carga no ensaio de corte de um betume;

W_{dcfb} - Energia dissipada por ciclo de carga no ensaio de fadiga de um betume;

σ_{t0b} - Valor da amplitude da tensão de tracção aplicada durante o ensaio.

E - ENSAIO BBR (BENDING BEAM RHEOMETER)

Quando a mistura betuminosa constituinte de uma camada de um pavimento experimenta um acentuado e rápido abaixamento de temperatura, devido à diminuição da temperatura ambiente, ocorrem no pavimento fenómenos de retracção, que introduzem nas camadas do pavimento, esforços de tracção. Quando essa retracção ocorre de forma muito rápida, as misturas betuminosas não são capazes de absorver aqueles esforços e fendilham como forma de aliviar as tensões.

O fendilhamento por retracção térmica desenvolve-se perpendicularmente à direcção longitudinal do pavimento e tanto pode ocorrer num único ciclo, quando se atinge um determinado valor de temperatura mínima, designado por temperatura crítica, ou para vários ciclos de carga, quando o valor da temperatura mínimo atingido no pavimento é superior ao valor da temperatura crítica.

Para avaliar o comportamento de um betume ao fendilhamento por retracção térmica, o programa SHRP desenvolveu um ensaio designado por ensaio de flexão em viga, BBR - Bending Beam Rheometer (figura 1.12). O ensaio consiste basicamente, na aplicação de um carregamento num provete de betume com forma prismática, mantido durante o ensaio num banho termostático, constituído por uma mistura de água, etilenoglicol e metanol. A carga é aplicada no ponto central do provete que se encontra apoiado em dois pontos extremos.

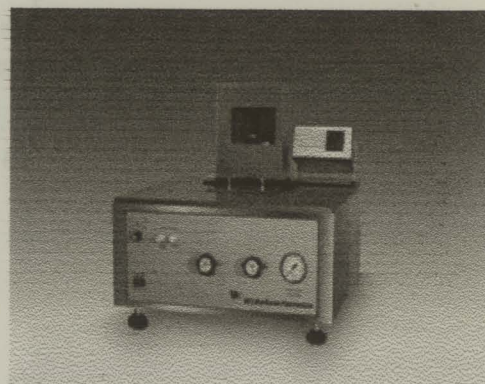
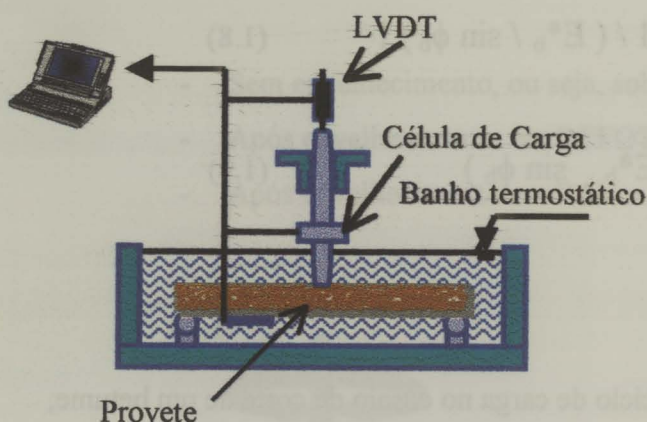


Fig. 1.12 Ensaio de flexão em viga de um betume

O equipamento possui um sistema de aquisição dos valores da força aplicada e da deformação sofrida pela viga a meio vão. O ensaio prevê a aplicação de uma força de 1 N durante 240 segundos sendo a rigidez do betume a baixas temperaturas quantificada como sendo o quociente entre a tensão instalada na secção transversal localizada sob o ponto de aplicação da carga e a respectiva extensão observada ao fim de 60 segundos.

F - ENSAIO DTT (DIRECT TENSION TEST)

Há certos tipos de betumes, nomeadamente alguns betumes modificados, que apresentam tensão de cedência muito elevada (acima dos 300 MPa), mas que não rompem uma vez que apresentam grandes alongamentos antes da rotura. Para este tipo de betumes, para os quais o ensaio de flexão em viga não é adequado, o programa SHRP desenvolveu o ensaio DTT (Direct Tension Test), ensaio de tracção directa (figura 1.13), por forma a avaliar o comportamento do betume a baixas temperaturas. O ensaio apenas é exigido para betumes que apresentem tensão de cedência entre os 300 e os 600 MPa para as temperaturas mínimas em serviço no pavimento.

O ensaio consiste em submeter um provete a um carregamento por tracção directa, a uma velocidade de incremento de carga constante, até à rotura. A extensão na rotura é dada

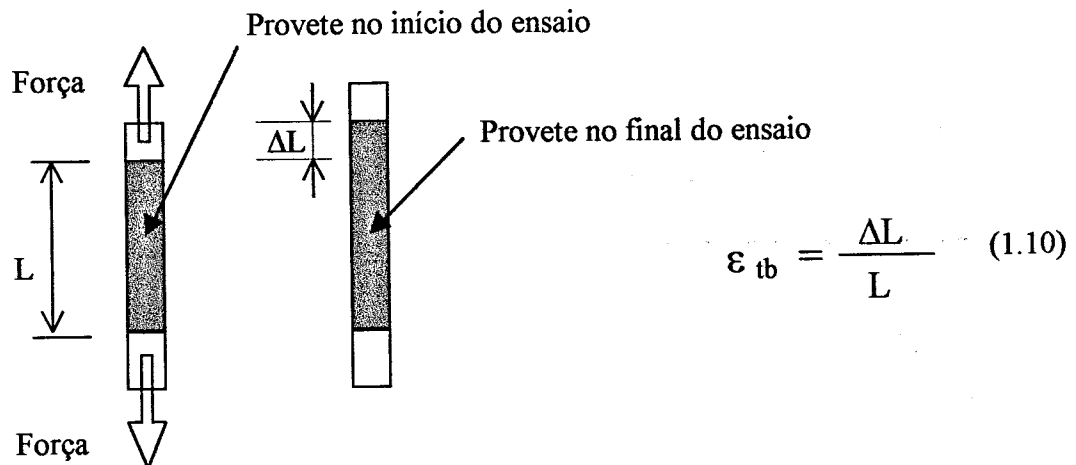


Fig. 1.13 Esquema do ensaio de tracção directa de um betume

pelo quociente entre o aumento de comprimento verificado pelo provete e o seu comprimento inicial (1.10). A extensão na rotura corresponde à máxima tensão instalada no provete, não sendo necessariamente igual ao valor da tensão no momento da rotura.

1.3.2 Agregados

Nas misturas betuminosas o componente que apresenta maior percentagem na sua composição é sem sombra de duvida a mistura de agregados. Estes constituem cerca de 80 a 85 % da mistura betuminosa se considerarmos uma relação volumétrica, passando esses valores a serem de 90 a 93 % se a relação considerada for do tipo gravimétrica.

Não é pois de estranhar que factores como:

- origem geológica;
- distribuição granulométrica;
- forma;
- microtextura;
- angulosidade da fracção areia;
- a distribuição na camada (esqueleto sólido),

sejam responsáveis por alterações significativas no desempenho das misturas betuminosas, nomeadamente o seu comportamento à fadiga.

Ensaio de fadiga realizados sobre misturas executadas com agregados de diversas origens geológicas [14], nomeadamente gabrodioritos, basaltos e seixos britados, conduziram a comportamentos das misturas betuminosas à fadiga bem distintos, verificando que, para iguais percentagens em betume, as misturas com gabrodioritos apresentaram pior comportamento à fadiga do que as misturas com seixos britados e estas por sua vez, pior comportamento que as misturas betuminosas com basaltos.

Também outros investigadores [15] concluíram nos seus trabalhos experimentais que a avaliação da vida à fadiga de uma mistura betuminosa deve ser realizada utilizando ensaios mecânicos, uma vez que a natureza geológica dos agregados é responsável por importantes variações no comportamento das misturas, aspecto que não é considerado nas expressões usadas na previsão desta característica.

1.3.3 Compactação

As operações de compactação das misturas betuminosas tem por objectivo a redução do índice de vazios da mistura obtida através do arranjo das partículas de agregado. Consegue-se assim um adensamento da mistura betuminosa, responsável por uma melhoria do comportamento mecânico e funcional da camada. Este aspecto é especialmente importante quando em presença de tráfego do tipo pesado e para as camadas cuja função é estritamente estrutural, como é o caso das camadas de base [2].

Uma boa compactação da mistura constituinte de uma camada do pavimento, contribui decisivamente, não só para o aumento da rigidez da mistura, mas também para uma melhor degradação de cargas provenientes do tráfego, o que conduz a uma diminuição das tensões horizontais e verticais instaladas na camada, garantindo um melhor comportamento da mistura quer à fadiga quer às deformações permanentes.

A maior ou menor facilidade das operações de compactação dependem da trabalhabilidade da mistura betuminosa no momento da operação e dos meios mecânicos utilizados.

A trabalhabilidade da mistura varia com o agregado no que diz respeito à forma e granulometria, as propriedades reológicas do betume para a temperatura de aplicação, as dosagens de betume e agregado e a ligação agregado/betume.

Por outro lado os meios e técnicas utilizadas na compactação fazem variar a porosidade, a distribuição do agregado na mistura e a ligação betume/agregado.

Conclui-se assim que muitos são os factores que influenciam a porosidade da mistura, uns ligados à própria mistura betuminosa, outros ligados com a técnica de compactação. Assim, é de prever para misturas betuminosas iguais, comportamentos à fadiga distintos, quando se verifica uma qualquer variação dos métodos de compactação e/ou na temperatura da mistura no momento da execução da compactação.

Ensaaios realizados no âmbito do programa SHRP, nomeadamente no projecto A003 [4], demonstraram a influência da porosidade das misturas na rigidez, vida à fadiga e deformações permanentes. Entre as muitas conclusões do estudo, salienta-se o facto de parecer verificar-se uma quebra de cerca de 100 MPa no valor da rigidez de uma mistura quando o seu volume de vazios aumenta 1%. Estes valores foram obtidos por via experimental pelo que devem ser considerados como valores médios, podendo no entanto não ser válida a sua generalização a misturas diferentes das ensaiadas.

1.3.4 Tráfego

O tráfego constitui uma outra característica, cujos parâmetros conduzem a variações no comportamento das misturas à fadiga, sob a acção de carregamentos sucessivos.

O tipo de veículo, a velocidade de circulação e a distribuição do tráfego no tempo constituem as três características associadas ao tráfego que originam respostas bem distintas por parte das misturas betuminosas.

O peso dos veículos, o número de eixos e a distância entre eles, e a secção de contacto do pneumático com o pavimento, são responsáveis pela variação do valor das tensões transmitidas pelos veículos ao pavimento, conduzindo assim a diferentes níveis de tensão e extensão nas respectivas camadas.

Variações na velocidade de circulação dos veículos, impõem necessariamente variações no tempo de carregamento, ou seja, na frequência com que o pavimento é

solicitado. No ponto 1.4 deste capítulo é explicado de que forma a vida à fadiga é influenciada pela variação da frequência de carregamento.

Por outro lado, a distribuição do tráfego com o tempo é outro factor muito importante no estudo do comportamento à fadiga das misturas betuminosas. Para um mesmo volume de tráfego, verifica-se um melhor comportamento à fadiga para distribuições do tráfego no tempo do tipo variável, principalmente nos casos em que se verificam grandes períodos de repouso entre dois carregamentos sucessivos, relativamente a distribuições do tipo constante, sem tempos de repouso entre carregamentos sucessivos.

1.3.5 Temperatura

A temperatura é, conforme já ficou descrito em ponto anterior, responsável por variações de comportamento dos betumes, aspecto que se reflecte necessariamente na mistura betuminosa, originando variações ao nível do seu comportamento mecânico e que serão tanto maiores quanto maior for a percentagem do betume na mistura betuminosa.

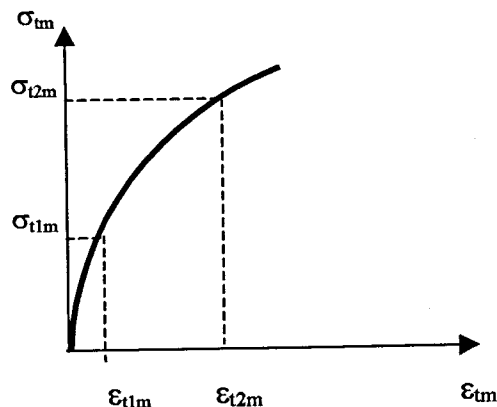
O comportamento à fadiga das misturas betuminosas é assim influenciado pela temperatura a que a mistura vai estar sujeita no pavimento. Este aspecto é objecto de análise no ponto 1.4 deste capítulo, onde é abordada a matéria referente à lei de fadiga de uma mistura betuminosa.

1.3.6 Rigidez das misturas betuminosas

As misturas betuminosas são materiais compostos exibindo o esqueleto mineral comportamento elástico e o betume comportamento viscoelástico. O comportamento das misturas é pois fortemente influenciado pela reologia do betume constituinte, tanto mais quanto maior for a percentagem em betume da mistura. Poder-se-á pois concluir que a rigidez de uma mistura betuminosa é função principalmente da rigidez do betume constituinte pelo que, um comportamento elástico/ linear para as misturas só pode ser admitido para baixas temperaturas. Tal como para os betumes, a rigidez de uma mistura betuminosa não é constante, variando com o tempo de carregamento, temperatura e valor da tensão aplicada.

Todas as considerações e expressões apresentadas no ponto anterior para a rigidez dos betumes mantêm-se válidas para a rigidez das misturas betuminosas. Assim, para uma mesma mistura betuminosa, verifica-se que:

1. A rigidez não é linear, sendo função do nível de extensão, ou do nível de tensão instalado. Uma mistura betuminosa apresenta, por aplicação de um carregamento sinusoidal de amplitude σ_{t1m} , uma extensão máxima de tracção de valor ϵ_{t1m} (fig 1.14). Se no entanto a amplitude do carregamento duplicar ($\sigma_{t2m} = k \cdot \sigma_{t1m}$), a mistura experimenta uma extensão máxima de tracção ϵ_{t2m} , superior ao produto $k \cdot \epsilon_{t1m}$. Assim, ensaios de determinação da rigidez de uma mistura betuminosa realizados para diferentes níveis de tensão, conduzem a valores da rigidez necessariamente diferentes, que serão tanto maiores quanto menor a amplitude da tensão de tracção definida para o ensaio;



$$\sigma_{t2m} = k \cdot \sigma_{t1m} \quad \epsilon_{t2m} > k \cdot \epsilon_{t1m}$$

$$\text{com } K > 1$$

$$\sigma_{t1m} / \epsilon_{t1m} > \sigma_{t2m} / \epsilon_{t2m}$$

$$E_{1m}^* > E_{2m}^*$$

Fig. 1.14 Variação da extensão com o nível de tensão instalado(representação esquemática)

2. A rigidez diminui com o aumento da temperatura para a mesma frequência de aplicação de carga (fig. 1.15). Quer isto dizer que uma mistura betuminosa quando sujeita a determinado nível de tensão apresenta maiores extensões para temperaturas mais elevadas (fig. 1.16);

3. A rigidez aumenta, para a mesma temperatura, com o aumento da frequência (fig 1.17). Significa pois que uma mistura betuminosa sujeita a determinado estado de tensão verifica maiores extensões quanto maior for o tempo de duração do carregamento, ou seja, na prática, quanto menor for a velocidade de circulação dos veículos (fig 1.18);
4. A rigidez diminui à medida que aumenta o número de ciclos de carga aplicados (fig 1.19). Este aspecto prende-se com fenómenos de fendilhamento resultantes do carregamento.

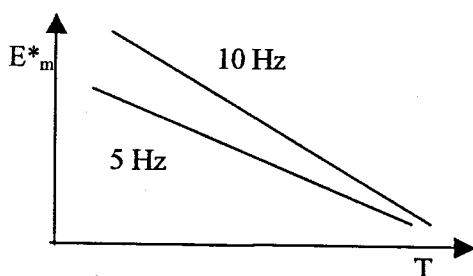


Fig. 1.15 Variação da rigidez de uma mistura betuminosa com a temperatura, para diferentes tempos de carregamento (representação esquemática)

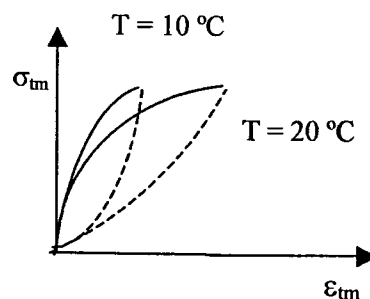


Fig. 1.16 Variação da extensão de tracção com a tensão de tracção instalada para diferentes temperaturas (representação esquemática)

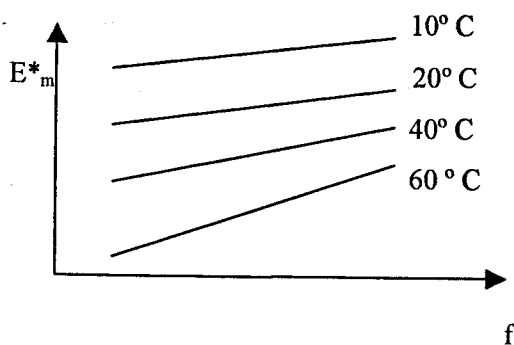


Fig. 1.17 Variação da rigidez de uma mistura betuminosa com a frequência, para diferentes temperaturas (representação esquemática)

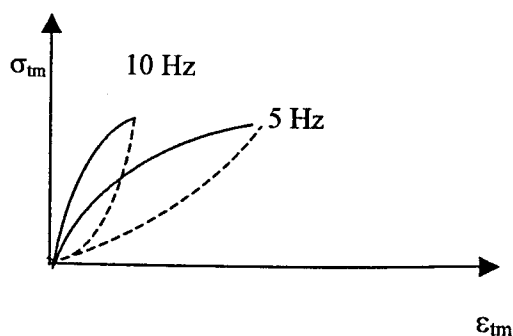


Fig. 1.18 Variação das extensões de tracção com as tensões de tracção instaladas, para diferentes frequências (representação esquemática)

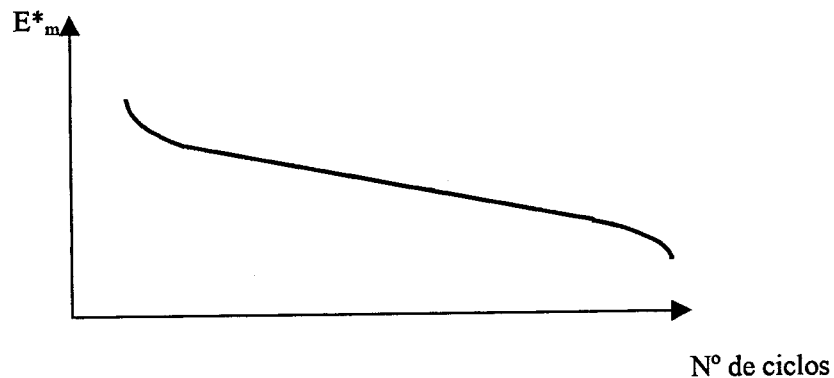


Fig 1.19 Variação da rigidez de uma mistura betuminosa com o número de ciclos de carga
(representação esquemática)

Para além de todos estes aspectos há ainda que referir a redução da rigidez das misturas betuminosas aplicadas no pavimento devida não só ao envelhecimento do ligante mas também aos estados de tensão induzidos pelas variações de temperatura.

Desde muito cedo, vários países concentraram esforços por forma a idealizar um método de ensaio capaz de medir com adequada repetibilidade e reprodutibilidade o módulo de rigidez de misturas betuminosas. Essa investigação foi conduzida tendo por base metodologias bem distintas pelo que actualmente existem vários métodos para a quantificação laboratorial da rigidez de uma mistura betuminosa. Todos eles no entanto se baseiam na aplicação dinâmica de cargas sinusoidais.

A Norma Europeia, ainda em preparação [16], irá prever assim, que a rigidez de uma mistura betuminosa possa ser determinada por qualquer um dos seguintes métodos:

- Por flexão, com aplicação de carga num ponto em provete trapezoidal em consola ;
- Por flexão, com aplicação de carga num ponto em provete rectangular em consola;
- Por flexão, com aplicação de carga num ponto a meio vão de um provete prismático de secção rectangular;
- Por flexão, com aplicação de carga em dois pontos em provete prismático de secção rectangular;

- Por compressão uniaxial em provete cilíndrico;
- Por compressão diametral em provete cilíndrico.

Para todos os métodos é necessário fixar as condições de ensaio no que diz respeito à temperatura, número de ciclos ao fim dos quais se quantifica a rigidez, a frequência de aplicação das cargas e a tensão, ou extensão instalada durante o ensaio. Apesar dos métodos de ensaio se destinarem à medição da mesma característica, os resultados obtidos nos ensaios são por vezes bem distintos uma vez que como já foi referido os valores observados são condicionados quer pela configuração quer pelo modo de carregamento.

A metodologia SHRP prevê a determinação do módulo de rigidez de uma mistura betuminosa deve ser realizada através de ensaios de flexão em viga, por aplicação cíclica de carga em dois pontos para 20 °C de temperatura, 10 Hz de frequência, extensão constante de 300×10^{-6} e para 100 ciclos de carga.

Os equipamentos e metodologias são em tudo semelhantes aos utilizados para a determinação laboratorial da resistência à fadiga de misturas betuminosas que serão apresentados no capítulo II deste trabalho.

No entanto a rigidez de uma mistura pode ser prevista através de expressões do tipo empírico. Segundo Heukelom e Klomp [17] a rigidez de uma mistura betuminosa (E_m^*) pode ser expressa, função da rigidez do betume, segundo a expressão (1.11):

$$E_m^* = E_b^* \cdot (1 + (2,5 \cdot C_v / n) / (1 - C_v))^n \quad (1.11)$$

Em que C_v representa a fracção do volume total ocupada pelo agregado e betume na mistura e para a qual o expoente n toma o seguinte valor:

$$n = 0,83 \cdot \lg (39 / E_b^*) \quad (1.12)$$

Uma outra forma de se obter um valor aproximado para o módulo de rigidez de uma mistura betuminosa é através da aplicação do diagrama apresentado na figura 1.20.

Este método [7] permite a obtenção da rigidez da mistura através do conhecimento da rigidez do betume e da distribuição volumétrica do betume e do agregado.

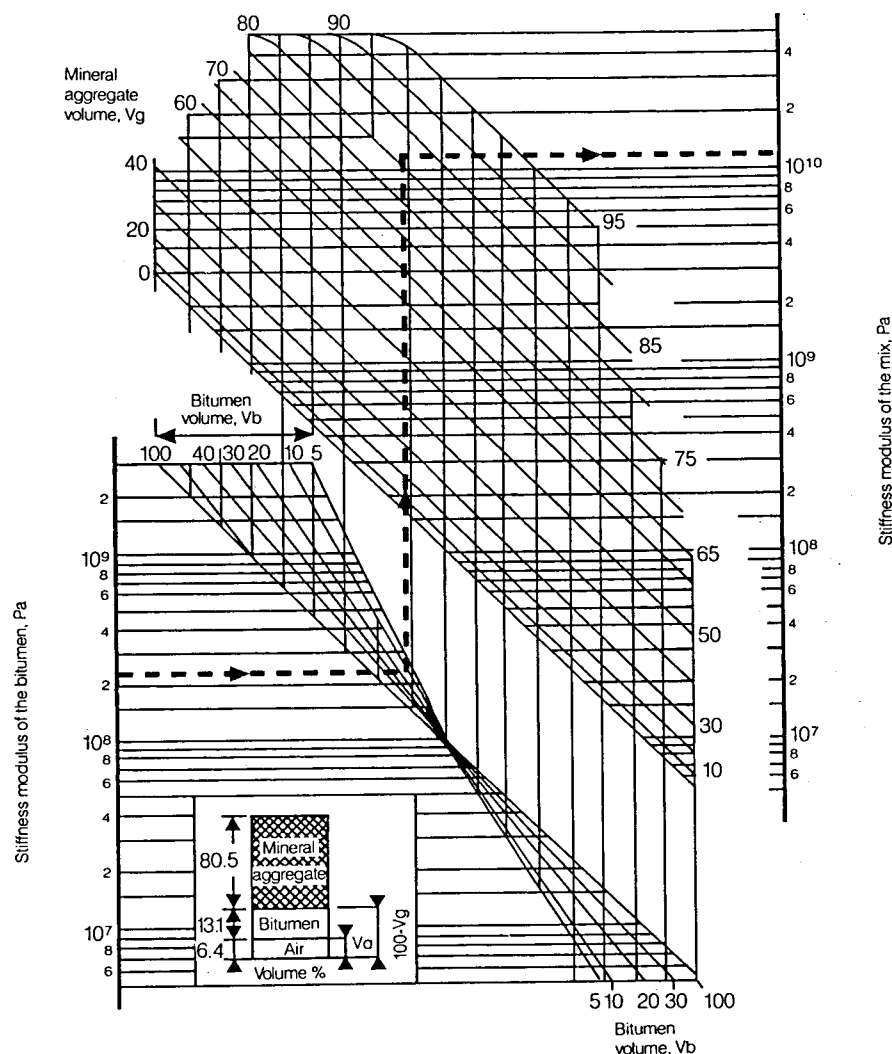


Fig. 1.20 Ábaco para a obtenção do módulo de rigidez de uma mistura betuminosa

1.4 As leis de fadiga

A ruína por fadiga, ou o que é o mesmo, a vida à fadiga de uma mistura betuminosa é expressa pelo número de ciclos de carga até à rotura. Ensaaios de fadiga realizados em vários provetes e para diferentes amplitudes da extensão de tracção mostram que o número de ciclos de carga até à rotura é função da amplitude da extensão aplicada durante o ensaio. Assim, quanto maior for a amplitude de extensão de tracção imposta ao provete, menor vai ser o número de ciclos de carga aplicados à mistura.

Refira-se desde já que os ensaios tanto podem ser realizados a tensão constante como a extensão constante. No primeiro caso, a amplitude da carga aplicada ao provete em cada ciclo de carga é mantida constante ao longo de todo o ensaio. Devido ao comportamento viscoelástico das misturas betuminosas a rigidez da mistura vai diminuindo ao longo do ensaio o que equivale dizer que a extensão vai aumentando com a aplicação cíclica das cargas. No segundo caso é mantida constante a amplitude da extensão de tracção pelo que a força aplicada ao provete vai diminuindo ao longo do ensaio.

Nos ensaios em tensão controlada as fendas propagam-se ao longo da espessura do provete de forma mais rápida, sendo a rotura da mistura bem visível. Nos ensaios com extensão controlada a propagação das fissuras é retardada não sendo evidente a rotura.

Os resultados dos ensaios de fadiga são apresentados de forma a estabelecer estas relações sendo geralmente expressos através da equação (1.13).

Esta expressão aplica-se a ensaios realizados em tensão controlada quer a ensaios realizados em extensão controlada.

$$N_f = a \cdot (1/\epsilon_{tm})^b \quad (1.13)$$

Em que :

N_f representa a vida à fadiga da mistura betuminosa, ou o número de ciclos de carga;

ϵ_{tm} representa o valor da amplitude da extensão de tracção aplicada ao provete de mistura betuminosa durante o ensaio;

a e b são coeficientes considerados constantes para o mesmo material e condições de ensaio e determinados experimentalmente.

Naturalmente a expressão (1.12) poderá tomar outra forma:

$$\log(N_f) = \log(a) - b \cdot \log(\epsilon_{tm}) \quad (1.13)$$

Esta expressão significa que, graficamente, a lei de fadiga terá um desenvolvimento linear se considerarmos num sistema de eixos coordenados, com escala logarítmica, marcados em abcissas o número de ciclos aplicados e em ordenadas o valor da extensão correspondente (figura 1.21).

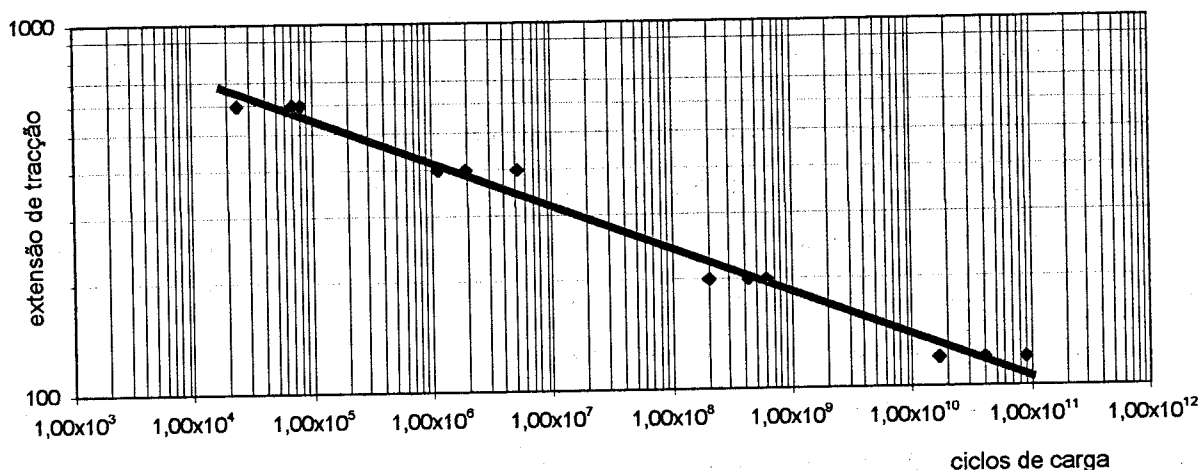


Fig 1.21 Relação entre a vida à fadiga de uma mistura betuminosa e a extensão de tracção

A vida à fadiga de uma mistura betuminosa colocada numa camada de um pavimento varia com muitos factores; uns tem a ver com as características da própria mistura outros com as condições ambientais e outros ainda com o tráfego.

Assim, antes de se darem início aos ensaios deve ponderar-se o tipo de equipamento a utilizar bem como o método de ensaio a seguir por forma a que as condições de carga e as tensões instaladas nos provetes reproduzam tão perto quanto possível o que se irá passar no pavimento quando colocado em serviço.

No capítulo II serão descritos os vários tipos de equipamentos bem como as metodologias que lhes estão associadas, destacando as vantagens e desvantagens de cada um deles.

O comportamento à fadiga varia, conforme já anteriormente analisado, com a própria mistura, dependendo dos seus componentes, suas dosagens e distribuição na mistura, com a compactação e com outros factores tais como:

- A temperatura, verificando-se um melhor comportamento à fadiga para temperaturas mais baixas. Esta relação é válida para a gama de temperaturas ambiente verificadas em Portugal. Para temperaturas muito baixas, no entanto,

verifica-se a inflexão do comportamento, observando-se uma redução da vida à fadiga com a diminuição da temperatura. Na figura 1.22 estão representadas duas curvas (A e B), que pretendem relacionar a vida à fadiga de uma mistura betuminosa com a temperatura, considerando a curva A o comportamento da mistura apenas para os estados de tensão provocados pelas acções mecânicas e a curva B o comportamento da mesma mistura mas considerando os estados de tensão provocados simultaneamente pelas acções mecânicas e térmicas, a baixas e muito baixas temperaturas [18].

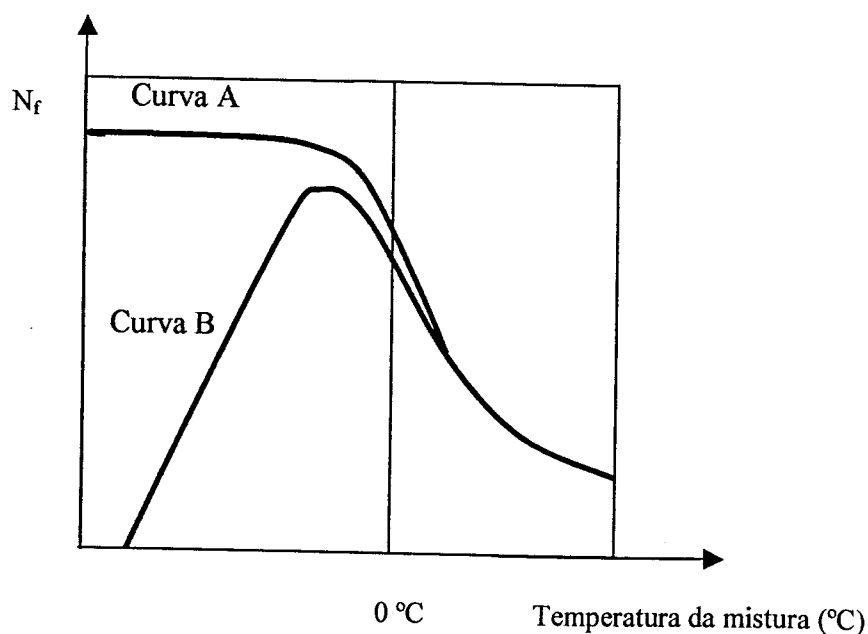


Fig 1.22 Variação da vida à fadiga de uma mistura betuminosa com a temperatura (representação esquemática)

- O nível de extensão ou tensão instalada, verificando-se um melhor comportamento à fadiga para níveis de extensão ou tensão mais baixos (fig. 1.23).
- A configuração do carregamento, apresentando melhor comportamento se existirem tempos de repouso, se o carregamento for definido por extensão constante, em contraste com tensão constante (figura 1.24).

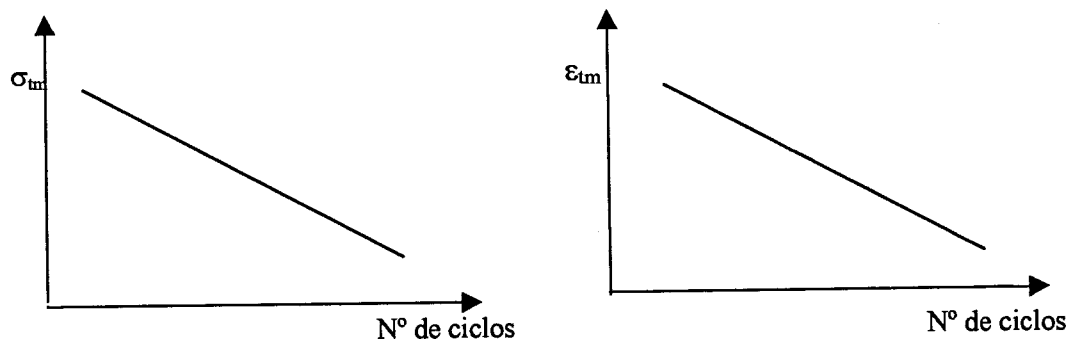


Fig 1.23 Variação da vida à fadiga com a tensão/extensão instalada
(representação esquemática)

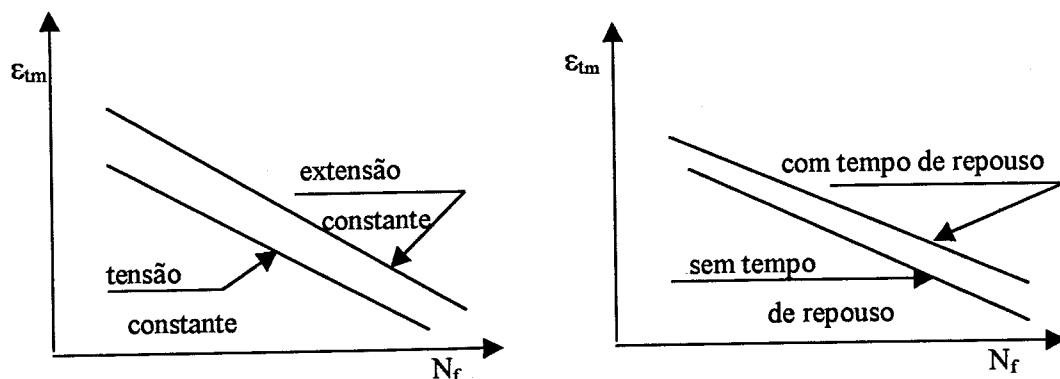


Fig 1.24 Variação da vida à fadiga com o tipo de carregamento
(representação esquemática)

1.5 Avaliação do comportamento à fadiga das misturas betuminosas

O comportamento à fadiga de uma mistura betuminosa pode ser avaliado essencialmente de duas formas: através de ensaios mecânicos ou através da aplicação de expressões obtidas por via experimental.

As expressões geralmente utilizadas na previsão da vida à fadiga [3] são as definidas pela SHELL, pelo Asphalt Institute (AI) e mais recentemente pela metodologia SHRP:

- SHELL

$$N_f = (\epsilon_{tm} / ((0,856 V_b + 1,08) \cdot E_m^{*-0,36}))^{-5} \quad (1.14)$$

em que:

V_b - Volume de betume na mistura betuminosa;

E_m^* - Rigidez da mistura betuminosa expressa em Pa.

- AI

$$N_f = S_f \cdot 10^{(4,84(VFB - 0,69))} \cdot 0,004325 \cdot (\epsilon_{tm})^{-3,291} \cdot (E_m^*)^{-0,854} \quad (1.15)$$

em que:

S_f - Factor para converter o resultado laboratorial em previsão no pavimento, considerado de 18,4 para 20% de área fendilhada;

VFB - Percentagem de vazios da mistura de agregados preenchidos com betume;

E_m^* - Rigidez da mistura betuminosa expressa em psi.

- SHRP

$$N_f = S_f \cdot 2,738 \times 10^5 \cdot e^{0,077 VFB} \cdot \epsilon_{tm}^{-3,624} \cdot (E_{vm})^{-2,720} \quad (1.16)$$

em que:

S_f - Factor para converter o resultado laboratorial em previsão no pavimento, considerado 10 e 14, respectivamente para 10 e 45% de área fendilhada;

E_{vm} - Componente imaginária da rigidez, dada pelo produto do módulo da rigidez pelo seno do ângulo de fase;

A análise destas expressões permite concluir no entanto que, em todas elas apenas são considerados alguns dos parâmetros que condicionam a vida à fadiga das misturas betuminosas. Assim, apenas os ensaios mecânicos realizados sobre provetes constituídos pela mistura betuminosa a avaliar, e para as condições reais a que a mistura vai estar submetida,

permitem a uma aproximação correcta ao comportamento real da mistura colocada na camada.

1.6 Conclusões

Pelo que ficou dito neste capítulo podem desde já ser evidenciadas algumas conclusões:

- Para um correcto dimensionamento da estrutura do pavimento torna-se imprescindível o conhecimento das propriedades mecânicas e do comportamento à fadiga das misturas betuminosas que o compõem.
- A utilização de expressões obtidas por via experimental, resultantes da realização de grande quantidade de ensaios deve ser considerada com grande reserva pois apenas são válidas para as condições de ensaio e para as misturas betuminosas estudadas. Como ficou evidenciado, a vida à fadiga depende de inúmeras variáveis não podendo pois ser prevista considerando apenas um ou dois parâmetros.
- Assim, para um conhecimento mais exacto do comportamento à fadiga de uma mistura betuminosa, esta característica deve ser obtida por via experimental, através da realização de ensaios de fadiga sobre essa mesma mistura, utilizando para as diversas variáveis os valores que melhor representem as condições reais a que vai estar sujeita a mistura em obra.

Por outro lado os fenómenos de ruína por fadiga podem ser consideravelmente minimizados, ou retardados, se forem considerados os seguintes aspectos:

- Ao nível dos estudos de concepção, realizar o cálculo do volume de tráfego, o mais rigoroso possível, nomeadamente o tráfego de veículos pesados, uma vez que é este o responsável pelos valores mais elevados das extensões de tracção;
- Dotar a estrada de um sistema de drenagem eficaz, e proceder à sua constante manutenção, por forma a garantir que a água não aceda à estrutura interna do pavimento.
- Utilização de materiais pouco sensíveis à água, para que a eventual existência de água não comprometa significativamente o comportamento mecânico do pavimento;

- Adopção de misturas betuminosas de elevada rigidez de modo a minimizar o valor das extensões de tracção instaladas.

CAPÍTULO II

CAPÍTULO II

OS VÁRIOS TIPOS DE ENSAIOS DE FADIGA

2.1 Introdução

Tem-se verificado ao longo dos últimos anos o desenvolvimento de vários métodos de ensaio e em alguns casos mesmo, diferentes tipos de equipamentos para metodologias semelhantes, para a caracterização laboratorial da fadiga das misturas betuminosas empregues em pavimentos rodoviários. Esses equipamentos têm por base a aplicação de cargas repetidas e procuram simular o efeito do tráfego nas misturas betuminosas, instalando nos provetes estados de tensão idênticos aos que se verificam " in situ ".

2.2 Princípios gerais

Como ficou dito no capítulo anterior, o comportamento à fadiga de uma mistura betuminosa colocada num pavimento depende, não só da composição da própria mistura, como o tipo e percentagem quer do agregado quer do betume, mas também com as suas características após colocação, como seja a sua porosidade e das acções a que vai estar sujeita, como o tráfego e a temperatura.

Por outro lado a avaliação laboratorial do comportamento à fadiga das misturas betuminosas depende de uma série de factores, como sejam:

- modo como os provetes são obtidos;
- método de ensaio utilizado;
- modo como o carregamento é realizado, em tensão controlada ou em extensão controlada;
- forma de carregamento;
- carregamento com ou sem tempo de repouso;
- frequência de aplicação de cargas;

- condições de temperatura durante o ensaio.

Os princípios em que se baseiam os diferentes métodos são os seguintes [19]:

- O fendilhamento por fadiga verifica-se numa zona muito próxima da base do conjunto das camadas betuminosas do pavimento e resulta da aplicação repetida de estados de tensão/extensão, sendo considerada determinante a extensão de tracção principal máxima.
- O estado de tensão ou extensão de tracção pode ser estudado, com boa aproximação, para determinados valores da amplitude da carga e de temperatura, pela teoria linear da elasticidade, pelo que o comportamento mecânico da mistura betuminosa é bem caracterizado, nesse intervalo, pelo seu módulo de rigidez e coeficiente de Poisson.
- Os ensaios devem ser prolongados até se verificar a ruína dos provetes, não devendo ser estimado o comportamento à fadiga que a mistura betuminosa apresentará quando caminha para a ruína, com base no desenvolvimento observado apenas em alguns ciclos de carga, pois o traçado pode apresentar fortes inflexões.
- O rodado de um veículo provoca a flexão do pavimento, pelo que a fadiga é basicamente um fenómeno de tracção. O comportamento à fadiga de uma mistura betuminosa aplicada na camada de um pavimento pode pois ser estudado não só em ensaios de flexão, mas para outro qualquer esquema estrutural desde que, em determinada secção transversal do provete, se instalem tensões de tracção. Se analisarmos a figura 2.1 [17], verificamos que uma qualquer secção do pavimento experimenta:
 - uma tensão horizontal máxima de tracção (σ_{1Mm}) junto à superfície superior da camada superficial do pavimento, imediatamente antes da passagem do veículo;
 - uma tensão horizontal máxima de tracção (σ_{2Mm}) na base do conjunto das camadas ligadas do pavimento, no momento da passagem do veículo pela secção;
 - nova tensão horizontal máxima de tracção (σ_{3Mm}) junto à superfície superior do pavimento, imediatamente após a passagem do rodado.

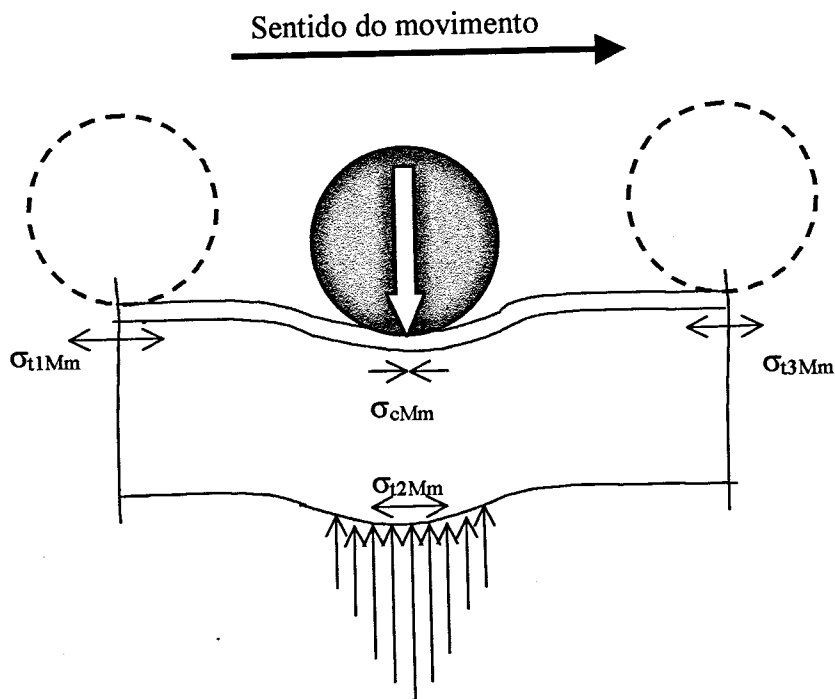


Fig. 2.1 Distribuição das tensões horizontais num pavimento flexível originadas pelas acções verticais devidas ao tráfego

No entanto as tensões de tracção devidas ao tráfego à superfície do pavimento são muito inferiores às que se verificam na base das camadas ligadas, pelo que o fendilhamento por fadiga têm início junto à base da camada ligada mais profunda do pavimento, zona onde as tensões de tracção provocadas pelo tráfego são máximas. A localização exacta das primeiras fendas devidas à fadiga depende no entanto da constituição do pavimento, nomeadamente da espessura e rigidez das camadas constituintes, bem como das condições atmosféricas a que o pavimento está sujeito. O sistema de carregamento nos ensaios deve ser capaz de definir, na secção de rotura do provete, tensões principais de tracção.

Os vários sistemas de carregamento são:

- tracção directa;
- tracção por compressão diametral;
- tracção por flexão;
- tracção por corte.

- Em carregamento simples o aparecimento das fendas por fadiga é função do nível de tensão ou extensão de acordo com a expressão (2.1) já apresentada no capítulo I.

$$N_f = a \cdot (1/\epsilon_{tm})^b \quad (2.1)$$

- A lei da sobreposição de efeitos de Miner (2.2) aplica-se em carregamento composto ou misto, como por exemplo, quando durante o mesmo ensaio variar o nível de extensão, a temperatura de ensaio ou a frequência.

$$\sum (n_i / N_i) = 1 \quad (2.2)$$

em que:

n_i representa o numero de ciclos de aplicação da ϵ_{tim} ou da σ_{tim}

N_i representa o numero de ciclos até à rotura de aplicação da ϵ_{tim} ou da σ_{tim}

2.3 Principais diferenças entre os métodos de ensaio

As principais diferenças entre as várias metodologias de ensaio podem ser particularizadas em quatro grupos: tipo de carregamento, forma de carregamento, tipo de equipamento e geometria e dimensões dos provetes.

Para além destas diferenças existem ainda algumas variáveis que necessitam definição para a execução do ensaio e que se designam por condições de ensaio. Refira-se no entanto que praticamente todos os equipamentos existentes permitem ao utilizador, fazer variar todas as características à excepção da forma e dimensões dos provetes, existindo mesmo alguns casos em que até estas características podem variar, com a utilização de acessórios adequados.

2.3.1 Tipo de Carregamento

Existem dois tipos de carregamento possíveis:

- Carregamento em tensão controlada;
- Carregamento em extensão controlada.

Este aspecto é de primordial importância uma vez que as misturas apresentam geralmente, comportamentos bem distintos quando se faz variar o tipo de carregamento.

Nos ensaios realizados em tensão controlada a amplitude do valor da tensão no carregamento sinusoidal (σ_{tm}) mantém-se constante ao longo do ensaio e as extensões de tracção (ϵ_{tm}) instaladas no provete devidas ao carregamento vão aumentando à medida que a rigidez diminui (fig. 2.2a) [18]. Nos ensaios realizados com controlo das extensões (ϵ_{tm}), impõem-se um valor para a amplitude da extensão que é mantido constante em todo o ensaio, verificando-se uma redução da carga aplicada ao provete ao longo dos ciclos de carga, pelo que se assiste a uma diminuição da tensão de tracção (σ_{tm}) instalada no provete durante o ensaio (fig. 2.2b).

A rotura dos provetes acontece mais cedo quando os ensaios são realizados a tensão controlada, relativamente aos ensaios realizados a extensão controlada. Os ensaios realizados em tensão controlada apresentam clara rotura do provete com fenómenos de fendilhamento bem visíveis. Nos ensaios com controlo das extensões o valor da amplitude da tensão aplicada ao provete nos ciclos finais é muito pequena pelo que o fendilhamento do provete não é evidente, não sendo pois visível a rotura do provete. Por este facto, e para qualquer um dos tipos de carregamento, estabeleceu-se que a rotura do provete é atingida quando o valor da rigidez da mistura diminuir para metade do valor daquela característica no início do ensaio.

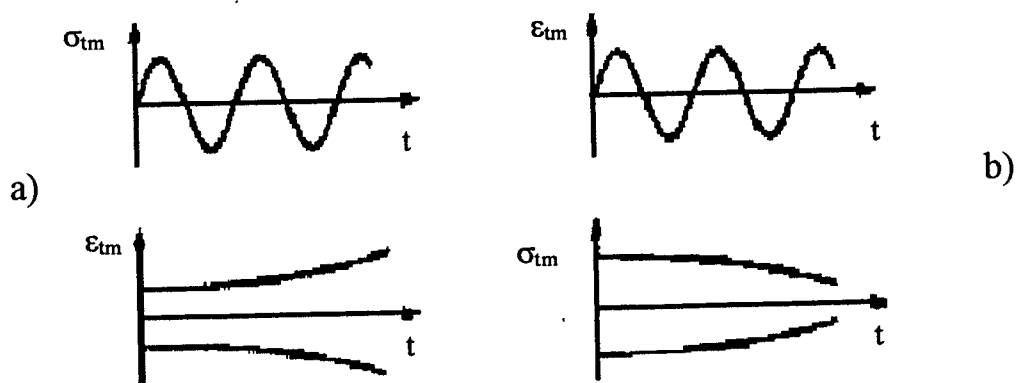


Fig. 2.2 Esquemas dos diagramas de tensões e extensões para os dois tipos de carregamento

Vários autores [2] [11] defendem a utilização de ensaios em tensão controlada para misturas betuminosas a aplicar em camadas espessas e ensaios em extensão controlada para ensaios em misturas a aplicar em camadas delgadas.

2.3.2 Forma de carregamento

A forma de realizar o carregamento dos provetes sujeitos a ensaios de fadiga pode ser muito diversa, realizando ou não a inversão do sentido do carregamento, aplicando um carregamento com ou sem tempo de repouso entre ciclos consecutivos e alterando o traçado do carregamento.

Considerando estas variáveis podem ser definidas combinações de diferentes carregamentos com diferentes tempos de repouso, o que obviamente resulta numa infinidade de formas de carregamento possíveis.

Na figura 2.3 é apresentado um exemplo de carregamento com forma sinusoidal com inversão do sentido de carregamento, sem tempo de repouso e na figura 2.4 é esquematizado um caso de carregamento, com forma rectangular, sem inversão do sentido de carregamento com utilização de tempo de repouso.

No entanto, para que os ensaios possuam características adequadas de repetibilidade e reprodutibilidade e para que os resultados obtidos sejam possíveis de interpretação, as normas de ensaio fixam a forma de carregamento, que obviamente são ajustadas às características do próprio equipamento, nomeadamente quanto ao dispositivo utilizado na aplicação da carga ao provete.

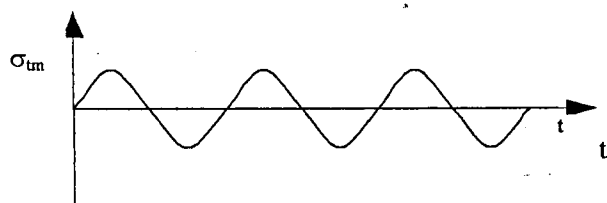


Fig. 2.3 Carregamento sinusoidal em tensão controlada

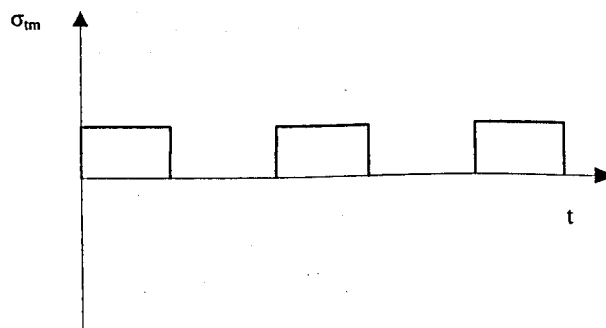


Fig. 2.4 Carregamento com forma rectangular em tensão controlada

2.3.3 Geometria e dimensões dos provetes

A forma e as dimensões dos provetes são definidas de acordo, não só com a forma de carregamento prevista no método de ensaio, mas também com a máxima dimensão do agregado utilizado na mistura. As diferentes formas dos provetes previstas nos vários ensaios de fadiga são as seguintes:

- Provetes cilíndricos;
- Provetes prismáticos de secção constante;
- Provetes prismáticos de secção variável;
- Provetes semicirculares [20].

2.3.4 Condições de ensaio

Para a realização dos ensaios de fadiga torna-se necessário fixar as seguintes condições:

- Frequência do carregamento;
- Temperatura de ensaio;
- Forma da onda de carregamento;
- Amplitude da força ou da extensão.

O comportamento à fadiga quantificado em laboratório, varia não só com o método de ensaio utilizado, mas também com o procedimento seguido na realização dos ensaios. Quer isto dizer, que basta alterar uma qualquer condição de ensaio das inumeradas, para que o resultado do ensaio seja consideravelmente distinto. Quanto a este último aspecto poderemos dizer que seria preferível realizar os ensaios com carregamento pulsatório, ou seja, incluindo um período de repouso, entre duas aplicações de carga sucessivas. Desta forma as condições de carregamento seriam mais próximas das acções que se verificam no pavimento. No entanto, não é fácil o conhecimento da distribuição do tráfego com o tempo, por forma a definir a duração desse período de repouso. Assim, é frequente a opção de realizar o carregamento do provete com um carregamento sinusoidal sem período de repouso, de modo a despendar menos tempo nos ensaios, sabendo-se que nestas condições os resultados obtidos são conservativos, uma vez que não estamos a permitir o relaxamento da mistura.

Refira-se ainda que o valor da rigidez inicial da mistura betuminosa, não deve ser considerado como aquele que se verifica no primeiro ciclo de carga, mas sim após alguns ciclos, quando se verificar uma relativa estabilização das condições impostas para o ensaio. Para os primeiros ciclos de carga a resposta da mistura é algo heterogénea uma vez que o provete experimenta uma variação do seu estado de tensão de uma forma instantânea, passando de um estado de repouso para um estado de carregamento dinâmico. Este aspecto no entanto desaparece após poucos ciclos de carga, quando se verifica uma adaptação do provete ao carregamento. O tempo necessário à estabilização das condições de ensaio depende do tipo de equipamento, nomeadamente se é hidráulico ou pneumático, da frequência do carregamento e da amplitude da tensão ou da extensão. O número de ciclos de carga ao fim dos quais se deve considerar o valor da rigidez como valor inicial é assim mais uma condicionante dos ensaios, pelo que deve ser fixado no procedimento de ensaio, com base numa experiência previamente adquirida.

As normas de ensaio de caracterização do comportamento à fadiga de uma mistura betuminosa devem definir claramente:

- O tipo de ensaio;
- A forma e dimensões dos provetes;
- A forma de carregamento;
- Tipo de carregamento;
- A frequência ou o tempo de carregamento;
- A temperatura de ensaio;
- O momento da rotura do provete.

No Quadro II.1 são indicados os factores que influenciam a vida à fadiga de uma mistura colocada num pavimento e os correspondentes factores a ter em conta na definição das variáveis de ensaio.

No entanto, qualquer que seja o método de ensaio utilizado, tem associado a ele dispersões nos resultados dos ensaios que ficam a dever-se fundamentalmente a três factores mais importante:

- heterogeneidade da própria mistura betuminosa.

A correcta definição da lei de fadiga de uma mistura betuminosa obriga à realização de ensaios sobre vários provetes, fazendo variar a extensão ou a tensão instalada nos provetes durante os ensaios, resultando pois a necessidade

de preparar grande número de provetes. Este aspecto obriga, em muitos casos, à realização de várias amassaduras, factor que pode originar diferenças sensíveis entre os provetes obtidos de amassaduras diferentes;

- inevitáveis variações entre provetes, como sejam a porosidade e a orientação dos agregados na mistura.

As misturas betuminosas são materiais compostos pelo que são de admitir pequenas dispersões entre provetes no que diz respeito à distribuição dos seus componentes;

- método utilizado na compactação da mistura.

A distribuição dos componentes na mistura é grandemente influenciada pelo método de compactação utilizado na moldagem dos provetes.

Quadro II.1 Correspondência entre os factores que influenciam a vida à fadiga de uma mistura betuminosa e as variáveis do método de ensaio

Factores que influenciam a vida à fadiga de uma mistura betuminosa	Tipo de variável a considerar no método de ensaio
Tipo de tráfego (ligeiro ou pesado)	→ Valor da extensão ou tensão de tracção
Velocidade do tráfego	→ Frequência de aplicação das cargas
Distribuição do tráfego no tempo	→ Carga sinusoidal ou pulsatória (ou seja com período de repouso entre duas cargas consecutivas)
Temperatura ambiente	→ Temperatura de ensaio
Características da mistura: Rígidez Teor em betume Grau de compactação Índice de vazios	→ Impor o máximo cuidado com todas as operações de amostragem, preparação e armazenagem dos provetes para que estes sejam homogénios e representativos da mistura "in situ"
Características dos componentes: Reologia do betume Tipo de agregados e sua orientação na camada	

2.4 Preparação dos provetes para ensaio

2.4.1 Métodos utilizados na obtenção dos provetes

Qualquer que seja a metodologia utilizada nos ensaios de fadiga, torna-se necessário proceder à preparação dos provetes para ensaio. Os provetes de mistura betuminosa necessários à realização dos ensaios podem ser obtidos de duas formas:

- Em laboratório, com mistura fabricada em laboratório ou recolhida em central;
- Em obra, por extracção de provetes do pavimento, executado por exemplo num troço experimental.

O fabrico das misturas em laboratório apresenta, relativamente à utilização de misturas fabricadas em central, as vantagens e desvantagens indicadas no quadro II.2.

Quadro II.2 - Vantagens/desvantagens do fabrico das misturas betuminosas em laboratório

VANTAGENS	DESVANTAGENS
- Controlo exacto da dosagem de cada um dos componentes, bem como das respectivas temperaturas; - Facilidade em fazer variar os constituintes da mistura ou as suas dosagens; - Não dependência da produção nem das condições climáticas.	- Exige equipamentos específicos : . estufas, no mínimo duas, uma delas de grande capacidade; . um misturador, de grandes dimensões, com sistema de aquecimento; - Disponibilidade de um local para o armazenamento dos componentes; - Dificuldade na obtenção de grandes quantidades de mistura. - Não inclui as inevitáveis variações que se verificam nas centrais de fabrico.

Os provetes apresentam geometria e dimensões distintas conforme o tipo de ensaio utilizado na avaliação das propriedades da mistura, podendo ser obtidos em laboratório, por moldagem ou por serragem de placas preparadas para o efeito, ou em obra através de serragem da mistura colocada na camada do pavimento. Este ultimo processo não pode obviamente ser adoptado em fase de estudo da mistura nem quando as dimensões do provete são incompatíveis com a espessura da camada, nomeadamente no caso de provetes cilíndricos, sempre que o valor da altura dos provetes fixado no procedimento de ensaio seja superior à espessura da camada do pavimento.

A normalização europeia sobre a preparação de provetes, ainda em preparação, prevê a moldagem de provetes cilíndricos pelo compactador Marshall, pelo compactador giratório e pelo compactador vibratório e a preparação de placas, com recurso a equipamentos como compactadores com rodas pneumáticas, com rodas metálicas ou com a utilização de placas verticais.

2.4.2 Métodos utilizados na compactação das misturas betuminosas

A compactação das misturas betuminosas é realizada com o objectivo de densificar a mistura, por expulsão do ar nela retido, procurando simultaneamente uma boa distribuição, sem segregação, dos seus componentes. Uma boa compactação conduz a misturas com melhor desempenho, observando-se uma melhoria de grande número das suas características, tais como:

- Resistência à rotura;
- Módulo de rigidez;
- Comportamento à fadiga;
- Comportamento às deformações permanentes;
- Durabilidade. A durabilidade de determinadas misturas betuminosas triplica quando o seu grau de compactação se eleva de 91 para 95,5% [21];
- Impermeabilidade e resistência aos sais descongelantes;
- Resistência ao desprendimento de mistura devido ao tráfego;
- Resistência ao envelhecimento por oxidação do betume.

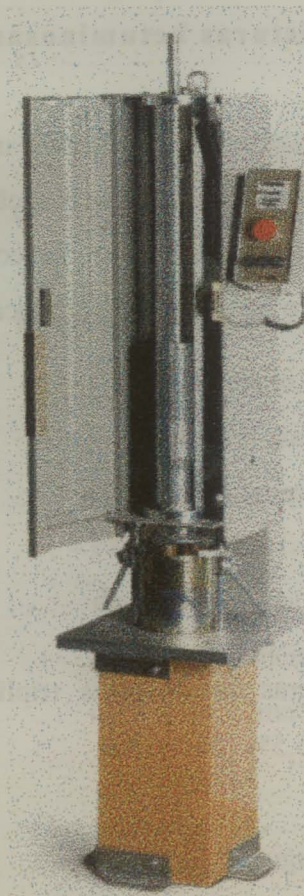
Existem várias metodologias para a obtenção de provetes em laboratório, devendo ser utilizada aquela que conduza a uma distribuição dos componentes da mistura no provete o mais idêntica possível com a mistura obtida na camada do pavimento em obra e a valores do índice de vazios da mistura, no provete e na camada, tão próximos quanto possível.

Vários trabalhos de investigação [2][22][23] permitiram concluir que, a avaliação das propriedades mecânicas das misturas betuminosas é fortemente dependente do método utilizado na compactação dos provetes de ensaio.

2.4.2.1 Métodos para a compactação de provetes cilíndricos

2.4.2.1.1 Compactador Marshall

Este método de compactação é utilizado na preparação de provetes cilíndricos e está associado à formulação de misturas betuminosas pelo método de Marshall (fig. 2.5).



O procedimento de compactação dos provetes encontra-se, em termos de normalização europeia, em fase de preparação, através da prEN 12697-30 [24], sendo objecto no entanto de norma portuguesa NP 142 [25], e de norma americana, ASTM D1559 [26].

A compactação da mistura dentro do molde é realizada de forma dinâmica, pela queda de uma massa de 4,5 kg de uma altura de 0,45 m. A energia é aplicada sobre toda a secção das duas bases do provete cilíndrico, com 102 mm de diâmetro e 64 mm de altura, sendo o número de quedas variável função do valor da massa volúmica aparente pretendido para a mistura betuminosa.

É um método que obviamente se afasta muito da técnica utilizada em obra e que consequentemente conduz a misturas com distribuição dos componentes bem diferente da verificada na mistura betuminosa colocada na camada do pavimento.

Fig. 2.5 Compactador Marshall

A utilização deste procedimento deve ser então restringida à metodologia Marshall, não devendo ser utilizada na preparação de provetes para ensaios quer de fadiga quer de caracterização mecânica, uma vez que ensaios realizados em provetes obtidos por esta metodologia, apresentam valores muito distintos dos obtidos em carotes extraídas do pavimento [22].

2.4.2.1.2 Vibrocompactador

O processo de compactação por vibrocompactação constitui um método usado na compactação de materiais granulares estabilizados mecanicamente ou ligados com ligantes hidráulicos. É uma metodologia desenvolvida em Inglaterra para o controlo da compactação daqueles materiais colocados em camadas de pavimento, encontrando-se normalizado através da norma inglesa BS 1377 [27].



Fig. 2.6 Martelo vibrocompactador

O método aplica-se também para as misturas betuminosas e consiste no adensamento da mistura dentro de um molde cilíndrico por aplicação de uma carga vibratória materializada por uma massa normalizada sujeita a uma vibração fornecida pelo martelo vibrador (fig.2.6). Por forma a simular o efeito de corte verificado na mistura betuminosa durante a compactação "in situ" com cilindros compactadores, o método prevê duas placas de diâmetro diferente, fazendo-se a compactação da mistura dentro do molde, inicialmente com uma placa de menor diâmetro, que actua em diferentes pontos da superfície, para no final se utilizar a placa de maior diâmetro, por forma a eli-

minar as irregularidade da superfície do provete.

O método encontra-se em fase de normalização europeia de acordo com a prEN 12697-32 [28].

Trabalhos desenvolvidos com este tipo de equipamento utilizado na compactação de misturas betuminosas [2] demonstraram que a distribuição dos componentes granulares na mistura não se assemelha à obtida em obra, tendo sido encontrados valores da massa volumica aparente da mistura dos provetes, significativamente diferentes dos valores obtidos, para a mesma característica em tarolos extraídos do pavimento.

2.4.2.1.3 Compressão estática



Fig. 2.7 Compressão estática

O processo de obtenção de provetes cilíndricos por compactação estática foi desenvolvido no LCPC em França, estando normalizado através da norma francesa NF P 98-251-1 [29] e constitui o método previsto para a obtenção de provetes para a realização do ensaio Duriez (fig.2.7). A compactação é realizada por aplicação de uma carga vertical, através de uma prensa, com o valor de 180 kN durante 5 minutos.

Este método apenas transmite um carregamento vertical durante o processo de compactação, originando o deslocamento das partículas tendencialmente nessa direcção. Este facto associado à proximidade das condições fronteira definidas pela superfície interior do molde, não permite um rearranjo das partículas por efeito de corte da mistura, como se verifica nos processos de compactação da mistura betuminosa na camada do pavimento em obra.

A compactação por compressão estática representa um método que apenas permite a obtenção de provetes cilíndricos, o que limita o tipo de ensaio de fadiga a utilizar, não se

obtendo nos provetes uma distribuição do agregado na mistura, idêntica à obtida "in situ" [2].

2.4.2.1.4 Compactador giratório

Este método permite a obtenção de provetes cilíndricos e foi desenvolvido nos EUA e em França, como um método para a formulação das misturas betuminosas, e encontra-se normalizado nesses países através, respectivamente das normas ASTM D 4013 [30] e NF P 98-252 [31] estando igualmente prevista a normalização desta metodologia em termos europeus através da prEN 12697-31 [32].

A metodologia SUPERPAVE prevê que a formulação das misturas betuminosas seja feita em três níveis, correspondendo o primeiro nível à formulação com base em parâmetros volumétricos dos componentes da mistura e dos vazios, obtidos em misturas betuminosas compactadas no compactador giratório [13].

A compactação da mistura é obtida através da aplicação de uma carga vertical estática, e da acção de corte que resulta do movimento de rotação imposto ao molde segundo o seu eixo vertical, que assim descreve uma superfície cónica de revolução (fig.2.8). A principal grandeza medida pelo compactador é a altura da mistura no molde, uma vez que conhecidos o diâmetro do molde e a massa da mistura colocada no seu interior, é possível calcular a massa volumica aparente da mistura betuminosa durante o processo de compactação.

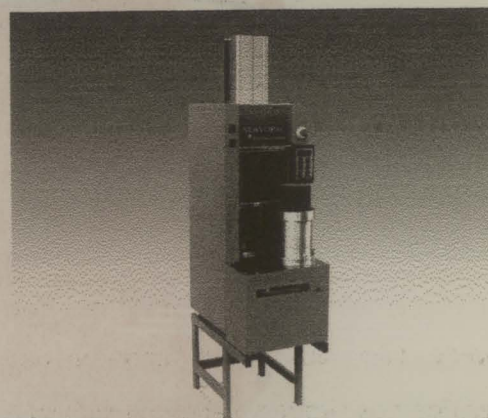
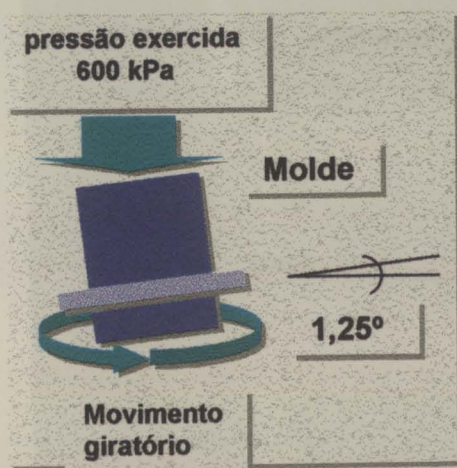


Fig. 2.8 Compactador giratório

Também a metodologia francesa de formulação de misturas betuminosas inclui o estudo da distribuição volumétrica das misturas betuminosas através da sua compactação num compactador giratório [33] [34].

Existem pois dois tipos fundamentais de compactadores giratórios. Um deles desenvolvido pelo LCPC de concepção bastante robusta, com sistema de aquecimento, o que permite manter a temperatura da mistura durante o ensaio, com regulação do ângulo de giração e com um funcionamento hidráulico no que diz respeito à aplicação da carga (figura 2.9). O outro tipo de compactador foi desenvolvido pelo programa SHRP (figura 2.8), com base num compactador já existente nos EUA, sendo constituído por um sistema de funcionamento pneumático ou hidráulico, que permite variar e controlar a carga aplicada, o ângulo de giração e a velocidade de rotação do provete. Segundo esta metodologia a tensão a aplicar à mistura é de 600 kPa, o ângulo de giração de $1,25^\circ$ e a velocidade de rotação de 30 rotações por minuto, variando o número de rotações a aplicar ao provete em função do nível de tráfego e da temperatura ambiente [11].



Fig. 2.9 Compactador giratório (PCG) desenvolvido no LCPC

2.4.2.1.5 Compactador kneading

O método de compactação laboratorial de misturas betuminosas designado por "kneading compactor" foi desenvolvido há já alguns anos nos EUA e prevê a compactação da mistura com recurso a um equipamento designado por "California Kneading Compactor" (fig.2.10). Este método encontra-se normalizado segundo as normas ASTM D 1561 [35] e ASTM D 3202 [36], consistindo o método na aplicação de cargas à mistura betuminosa através de uma base de secção em segmento de círculo existente no compactador. Uma vez colocada a mistura dentro do molde, faz-se baixar a base do compactador e aplica-se uma carga durante um certo período de tempo. Terminado esse tempo é retirada a base de dentro da mistura, o molde roda e é novamente aplicado o mesmo carregamento. Estas operações são repetidas até à completa compactação da mistura betuminosa. Este efeito, designado na terminologia inglesa por "kneading" é responsável pela simulação do fenómeno verificado em obra. No final é aplicada uma carga estática de 2070 kPa, ou superior caso se pretenda reduzir o volume de vazios da mistura, por forma a regularizar a superfície do provete. Com este tipo de equipamento é possível a compactação da mistura betuminosa quer em molde cilíndrico quer em molde prismático, possuindo o compactador, para este último caso, uma base de secção rectangular deslocando-se o molde segundo o seu eixo longitudinal.

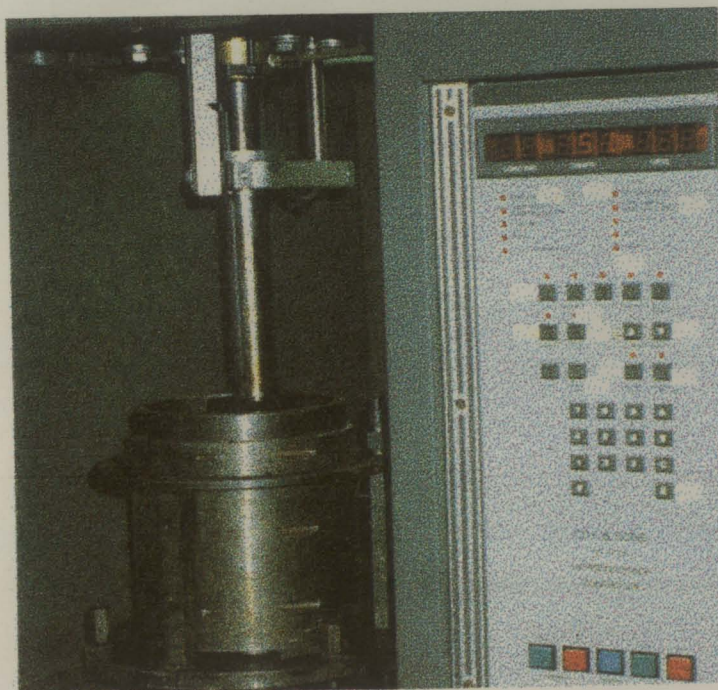


Fig. 2.10 Compactador kneading

Dado que nenhum dos países membros do CEN (Comité Europeu de Normalização) possui norma sobre esta metodologia, não está prevista sua adopção como metodologia de ensaio em termos de norma europeia.

2.4.2.2 Métodos para a compactação de provetes prismáticos e placas

Alguns ensaios realizados sobre misturas betuminosas implicam a preparação de provetes com forma prismática e de dimensões relativamente grandes. Torna-se necessário nesses casos obter placas da mistura betuminosa devidamente compactada, que em alguns casos constituem os provetes para ensaio ou, em alternativa, permitem a serragem de provetes com a forma e as dimensões desejadas.

A norma europeia sobre a preparação dessas placas encontra-se em fase de preparação, prEN 12967 parte 33 [37] e prevê três métodos para a obtenção das placas: compactador com uma ou duas rodas com pneumáticos, compactador com um segmento de roda metálico e um compactador com roda metálica com a interposição de placas metálicas.

2.4.2.2.1 Compactação com cilindro metálico de rasto liso

Para além desses métodos, a compactação das misturas betuminosas em laboratório, pode ser realizada com recurso a cilindros compactadores semelhantes aos usados na compactação das misturas em obra. Esta metodologia é prevista no programa SHRP e, perante os resultados obtidos em numerosos trabalhos de investigação entretanto realizados [2][3][4][23], constitui, segundo os seus autores, o método mais adequado, para a obtenção de misturas betuminosas com uma distribuição e orientação do agregado que melhor se assemelha às misturas obtidas "in situ". Das lajes produzidas em laboratório, geralmente com dimensões em planta aproximadas de $1,0 \times 0,5 \text{ m}^2$, podem ser obtidos os provetes com forma desejada, por corte com serra de disco plano ou carotagem. Este método exige no entanto, o fabrico de grandes volumes da mistura, o que implica o laboratório possuir para além do cilindro compactador e de estufas uma misturadora de grandes dimensões.

2.4.2.2.2 Compactador com uma ou duas rodas com pneumáticos

Este método, desenvolvido em França no LCPC, encontra-se normalizado através da NF P 98-250-2 [38] e consiste basicamente na compactação da mistura em moldes de forma paralelepípeda obtendo-se placas com as dimensões de 50 x 18 ou 60 x 40 m². Essas placas são usadas, na metodologia francesa, não só para a obtenção por serragem de provetes para os ensaios de fadiga, mas também na realização de ensaios de resistência à formação de rodeiras.

A compactação da mistura é realizada pela passagem de um eixo, com um ou dois pneumáticos, num movimento de vai e vem, alternando a sua posição transversal durante a compactação (fig. 2.11). A mistura é compactada por camadas e o número de passagens do eixo compactador é ajustado por forma a ser atingido o grau de compactação pretendido para a mistura.

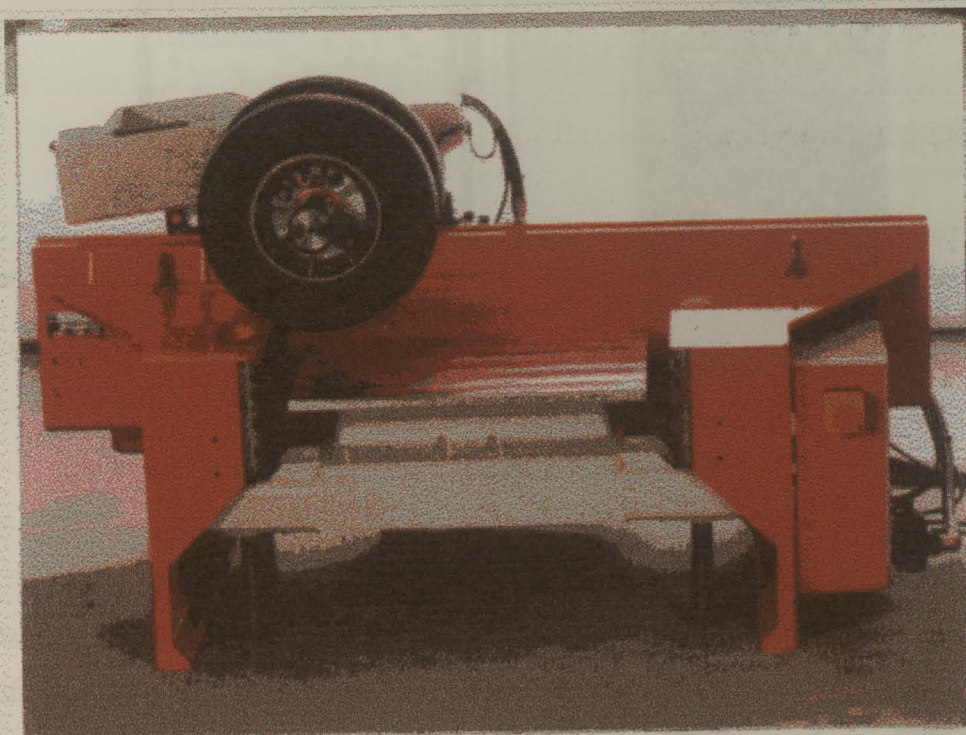


Fig. 2.11 Compactador com pneumáticos desenvolvido no LCPC

2.4.2.2.3 Compactador com segmento de roda metálica

Neste método, desenvolvido nas ilhas Britânicas com a designação de "roller compactor", a compactação da mistura betuminosa dentro dos moldes é obtida através do movimento de vai e vem do molde segundo o seu eixo longitudinal (fig.2.12). No seu movimento o molde passa sob um sistema de compactação constituído por um segmento de uma roda circular, metálico, que à passagem do molde adensa a mistura betuminosa nele contida (fig.2.13). O equipamento é mantido dentro de uma câmara climática por forma a manter a temperatura da mistura. O sistema foi desenvolvido na Universidade de Nottingham e encontra-se em fase de normalizado europeia [36].

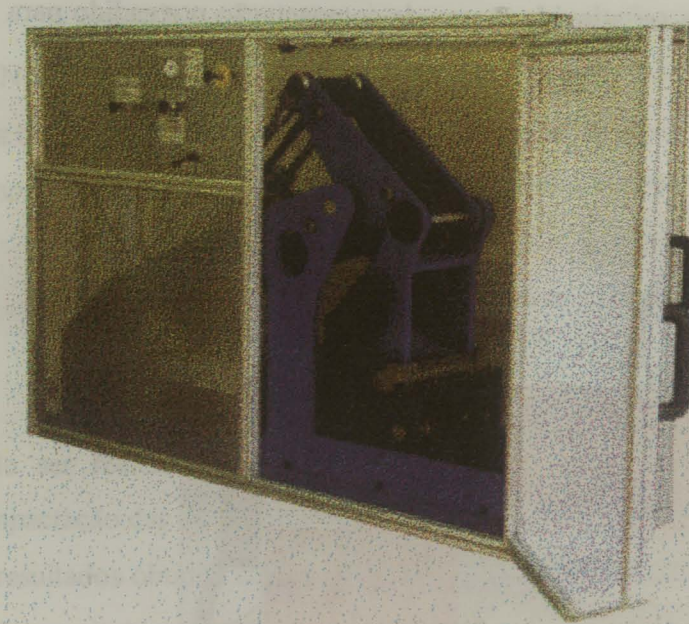


Fig. 2.12 Compactador com segmento de roda metálica

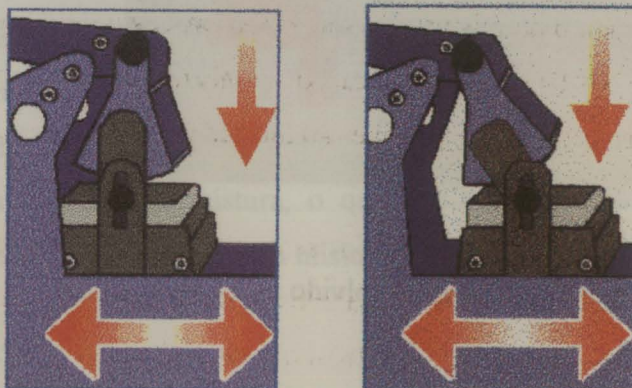
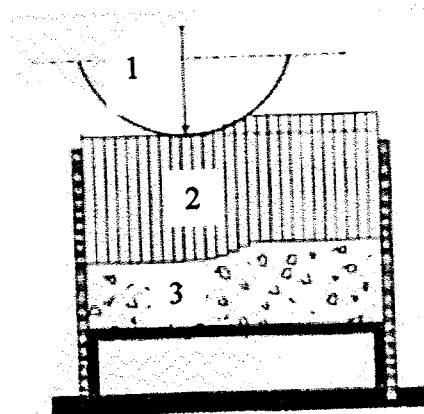


Fig. 2.13 Compactador com segmento de roda metálica (representação do funcionamento)

2.4.2.2.4 Compactador com placas metálicas com acção "kneading"

Na Alemanha foi desenvolvido um método de compactação das misturas betuminosas [22]., em que o efeito "kneading", já referido em ponto anterior, é conseguido através do deslocamento vertical, dentro do molde, de umas placas metálicas posicionadas verticalmente umas ao lado das outras e colocadas entre a mistura betuminosa a compactar e o sistema de aplicação de cargas (fig.2.14). A compactação da mistura é realizada por um movimento de vai-vem do rolo compactador, que obriga as placas a deslocarem-se verticalmente, deslizando umas contra as outras sob o rolo de compactação, no sentido descendente à passagem do rolo e no sentido ascendente após a sua passagem.



- 1- rolo compactador
- 2- placas metálicas
- 3- mistura betuminosa

Fig. 2.14 Compactador com placas metálicas

2.4.3 Envelhecimento da mistura betuminosa

Por forma a simular o envelhecimento da mistura durante o seu processo de fabrico e trabalhos de pavimentação, o programa SHRP prevê a colocação da mistura betuminosa em estufa ventilada, a 135°C durante 4 horas, antes de se proceder ao fabrico dos provetes ou das placas [39].

Segundo a mesma metodologia, os provetes para avaliar as propriedades da mistura ao fim de vários anos de entrada ao serviço, deverão ser ensaiados após armazenamento em estufa ventilada a uma temperatura de 85 °C durante 2 ou entre 4 a 5 dias, simulando-se desta

forma o envelhecimento da mistura colocada na camada ao fim de 5 e 10 anos respectivamente.

Esta metodologia foi estabelecida com base num vasto programa experimental que consistiu fundamentalmente na realização de ensaios para uma grande variedade de misturas, utilizando não só diferentes tipos de agregados mas também diferentes tipos de betumes. Os ensaios de determinação da rigidez das misturas, por exemplo, foram realizados para provetes obtidos por corte de pavimentos com diferentes idades e para provetes moldados em laboratório, em que foram utilizados os mesmos agregados e betume empregues na execução dos pavimentos carotado, fazendo variar o tempo e a temperatura de conservação dos provetes moldados antes dos ensaios [15].

As conclusões obtidas nesse programa não estão no entanto ainda bem evidenciadas pois o envelhecimento de uma mistura betuminosa nova apenas é conseguido por oxidação a elevadas temperaturas, não realizando pois o efeito das outras solicitações como o tráfego. Este aspecto parece principalmente discutível quando se pretende aplicar aos ensaios de fadiga, uma vez que o efeito de fadiga das misturas betuminosas é um processo de acumulação de efeitos que tem início logo após a abertura do pavimento ao tráfego, e não apenas quando a mistura betuminosa já possui vários anos após a sua aplicação no pavimento.

2.5 Tipos de ensaios e equipamentos existentes na determinação da vida à fadiga de misturas betuminosas

Existem actualmente várias metodologias para o estudo do comportamento à fadiga das misturas betuminosas, desenvolvidas em vários países procurando todas elas, aplicar ao provete de ensaio, estados de tensão o mais semelhante possível, com aqueles que se verificam na camada do pavimento quando solicitado pelo tráfego.

Todos os ensaios no entanto, baseiam-se na aplicação repetida de cargas (carregamento cíclico), simulando o efeito do tráfego sobre a mistura colocada no pavimento.

As metodologias existentes para a realização de ensaios de fadiga são, entre outras:

- Ensaio de flexão em viga com aplicação de carga no ponto central;
- Ensaio de flexão em viga com aplicação de carga em dois pontos;

- Ensaio de flexão em consola trapezoidal;
- Ensaio de flexão sobre fundação contínua;
- Ensaio de tracção directa;
- Ensaio triaxial;
- Ensaio de compressão;
- Ensaio de corte directo;
- Ensaio de corte por torção em consola;
- Ensaio de compressão diametral;
- Ensaio de fractura;
- Ensaio com carga rolante de vai-vem;
- Ensaios a escala real em "fosso" laboratorial e em pistas lineares ou circulares.

De todos estes ensaios aqueles que apresentam maior representatividade são os ensaios de flexão em viga com carregamento central num ou em dois pontos, desenvolvidos respectivamente pela SHELL na Holanda e pelo programa SHRP nos EUA, os ensaios de flexão em consola sobre provetes trapezoidais, desenvolvidos pelo LCPC em França e os ensaios de compressão diametral desenvolvidos na Universidade de Nottingham em Inglaterra.

2.5.1 Ensaio de compressão diametral

O equipamento utilizado neste tipo de ensaio encontra-se representado na figura 2.15 e é constituído por um sistema de aplicação de cargas, com funcionamento hidráulico ou pneumático, uma célula de carga que mede o valor da força aplicada numa das geratrizes do provete cilíndrico e transdutores do tipo LVDT localizados no plano horizontal, perpendicularmente ao plano de carga e colocados de forma diametralmente oposta. Por aplicação das cargas desenvolve-se no provete um estado de tensão de tracção no plano perpendicular à direcção do carregamento e ao longo do plano diametral vertical. Esse estado de tensão é praticamente constante ao longo de todo o plano vertical, verificando-se assim a rotura do provete numa zona de tensão máxima de tracção. O diagrama de tensões instalado no provete encontra-se esquematizado na figura 2.16.

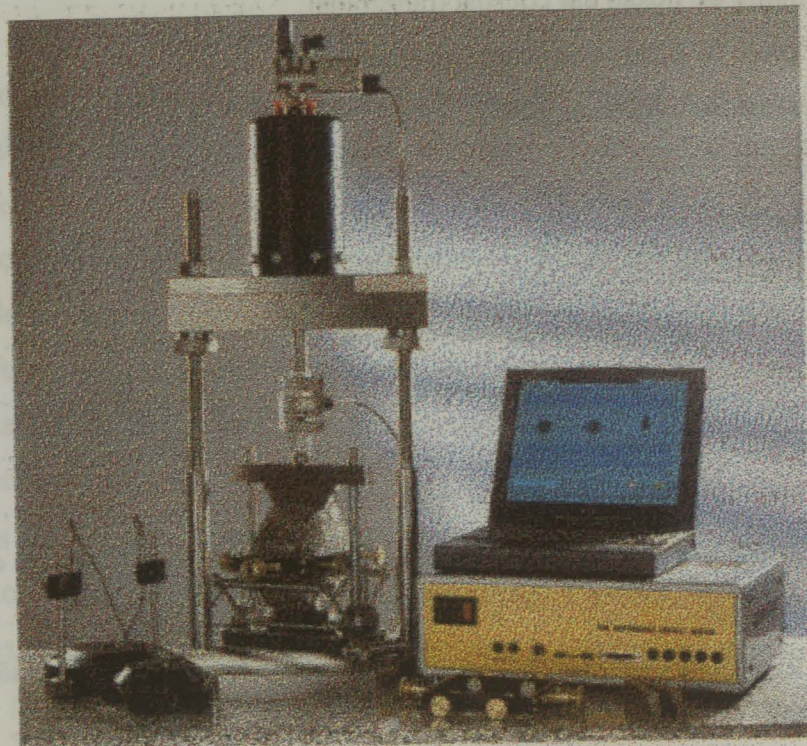


Figura 2.15 - Equipamento para a realização do ensaio de compressão diametral

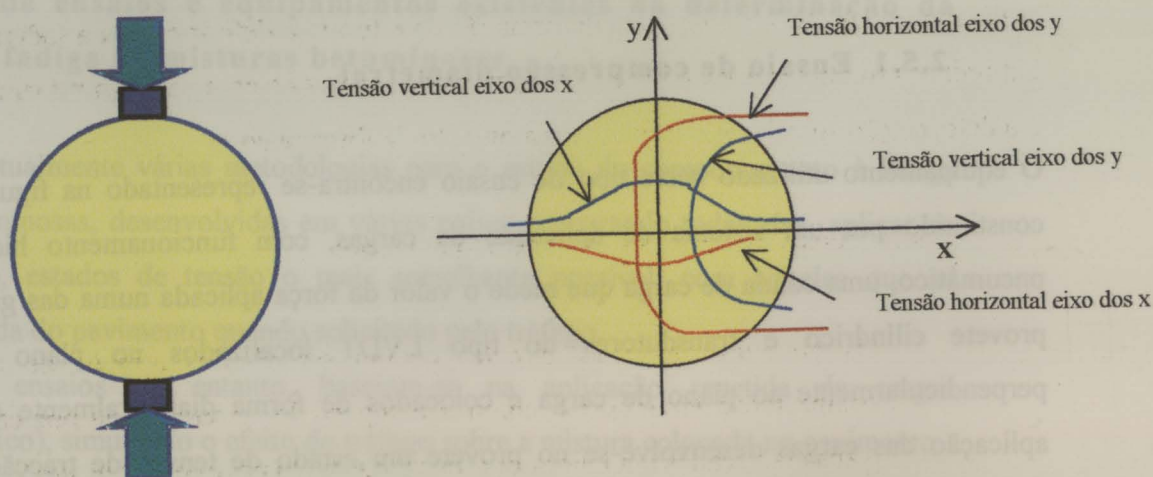


Fig. 2.16 Ensaio de compressão diametral. Esquema de carregamento e do diagrama de tensões instaladas no provete

Neste equipamento a quantificação de rigidez de misturas betuminosas, encontra-se já normalizada há algum tempo, nomeadamente nos EUA, ASTM D 4123 [40] e Inglaterra [41] e previsto na futura norma europeia [42]. A sua utilização em ensaios de fadiga sofreu forte desenvolvimento em Inglaterra, nomeadamente na Universidade de Nottingham, encontrando-se o método a ser objecto de normalização em Inglaterra [43].

O equipamento consiste essencialmente nos seguintes constituintes:

- Pórtico para realização da reacção às cargas aplicadas durante o ensaio;
- Actuador da carga, podendo ser um sistema hidráulico ou pneumático;
- Célula de carga para quantificação da amplitude da carga aplicada;
- Sistema para colocação do provete, que inclui duas barras para distribuição linear da carga;
- Sistema de posicionamento dos LVDT de leitura da deformação;
- Unidade de controlo e aquisição de resultados;
- Aplicações informáticas apropriadas que permitam o tratamento de dados e resultados.

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

As vantagens associadas a esta metodologia são:

- Os provetes de forma circular podem ser obtidos através de métodos de compactação laboratorial, como o compactador giratório, ou por carotagem de placas fabricadas em laboratório ou retiradas do pavimento "in situ".
- É uma metodologia muito simples, quer no que diz respeito à técnica de ensaio quer na interpretação dos resultados;
- O estado de tensão é do tipo bi-axial. No entanto, não permite a inversão e o controlo das tensões tangenciais;

- A rotura do provete dá-se numa secção de tensões de tracção uniformes e máximas.

As desvantagens associadas podem ser referidas como:

- O provete, para cada ciclo de carga realizado, não recupera a totalidade da deformação imposta, verificando-se a aplicação de novo carregamento sem se observar a recuperação total da deformação sofrida no carregamento anterior. Verifica-se pois a acumulação da deformação com a aplicação cíclica de carga, facto que resulta na obtenção de deformações permanentes. Apesar de na prática ser este o fenómeno verificado no pavimento, este aspecto torna mais difícil a interpretação dos resultados.
- A avaliação da rigidez de misturas betuminosas obtida através de ensaios por compressão diametral tem vindo a evidenciar a tendência para a obtenção de valores mais elevados do que os que se obtêm nos ensaios de flexão e de compressão axial [3].

2.5.2 Ensaio de flexão em viga com aplicação central de carga

Estes ensaios utilizam vigas de secção rectangular sobre as quais são aplicadas carregamentos centrados num ponto ou em dois pontos, designados na terminologia inglesa respectivamente por "three point load bending" e "four point load bending" (fig. 2.17 e 2.18). O primeiro tipo de ensaio é utilizado na Holanda nos laboratórios da SHELL [7] e o segundo é preconizado na metodologia SHRP com utilização já com alguma expressão em Portugal. O ensaio consiste na aplicação de um carregamento através de um sistema que agarra o provete e que por isso permite a inversão do sentido da carga. Um LVDT posicionado a meio vão da viga permite obter a deformação máxima sofrida pelo provete, sendo assim possível, através da teoria da elasticidade, o cálculo da extensão máxima de tracção instalada na secção transversal a meio vão.

Os sistemas desenvolvidos para a realização dos ensaios são muito idênticos, quer se trate de carregamento num ou em dois pontos e será descrito pormenorizadamente no capítulo III deste trabalho. No entanto o ensaio que aplica a carga em dois pontos possui uma vanta-

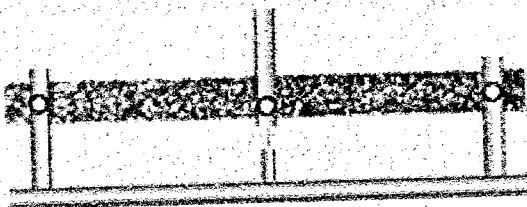


Fig 2.17 Ensaio de flexão com carregamento central num ponto

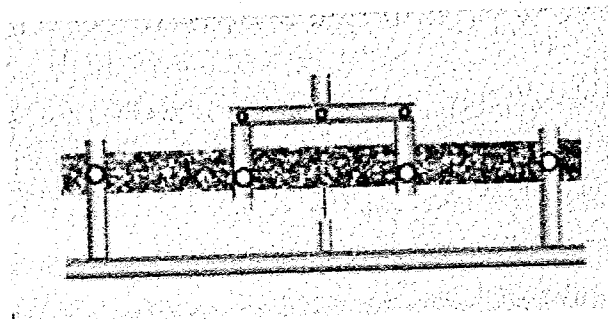


Fig. 2.18 Ensaio de flexão com carregamento central em dois pontos

gem enorme relativamente ao ensaio com aplicação apenas de uma carga a meio vão.

Para este último ensaio a tensão máxima de tracção apenas é verificada para a secção do provete posicionada sob a carga aplicada. A existência de uma imperfeição numa outra secção do provete pode originar que a rotura do provete não ocorra na secção de tensão de tracção máxima. Pelo contrário, para o ensaio com aplicação de carga em dois pontos, a extensão do provete onde as tensões de tracção são máximas é de cerca de um terço do seu vão, sendo desta forma mais provável que a rotura do provete se dê numa secção onde estão instaladas, durante todo o ensaio, tensões máximas de tracção.

O ensaio com carregamento em dois pontos é o mais difundido em Portugal, existindo até à data equipamentos hidráulicos e pneumáticos em vários laboratórios [2][3][19][44].

A metodologia SHRP prevê a realização de ensaios de fadiga por aplicação de esforços de flexão em provetes prismáticos, obtidos por flexão com carregamento em dois pontos, do tipo sinusoidal, com controlo das extensões de tracção, para uma temperatura de 20°C e uma frequência de 10 Hz.

As vantagens associadas aos ensaios com carregamento em dois pontos são:

- Funcionamento estrutural muito simples e boa compreensão dos resultados obtidos;
- A rotura ocorre numa zona de tensões constantes e máximas, aspecto que conduz a uma menor dispersão de resultados dos ensaios.

As desvantagens associadas ao método parece ser apenas uma e consiste na dificuldade em obter os provetes pois obriga à compactação de placas, para depois por serragem se obterem os provetes de ensaio.

2.5.3 Ensaio de flexão em provete trapezoidal em consola

Este tipo de ensaio é previsto na metodologia francesa e belga, tendo sido desenvolvido pelo LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées) e sendo realizado praticamente apenas nesses dois países. O método de ensaio encontra-se normalizado em França NF P98 - 261-1 [45] e é o único ensaio previsto na futura norma europeia, que se encontra ainda em fase de pré-norma pr EN 12697-24 [46], dado ser o único ensaio de fadiga normalizado nos estados membros do CEN.

O equipamento de ensaio consiste basicamente num sistema eléctrico de aplicação de forças na extremidade livre de um provete trapezoidal em consola (fig 2.19). O equipamento regista não só a força aplicada mas também o deslocamento sofrido pela mesma extremidade, através de um transdutor de deslocamentos, e o número de ciclos aplicados. A forma e dimensões do provete foram fixadas por forma a afastar da base do provete a secção de tensões transversais máximas, impondo assim a rotura do provete numa secção distinta da base correspondente à fixação do provete, garantindo que o sistema de colagem do provete ao apoio não interfere no decurso do ensaio, aspecto que iria necessariamente impedir a interpretação dos resultados obtidos.

As vantagens associadas ao método são as seguintes:

- O dispositivo de aplicação da carga ao provete é fixo à superfície de topo do provete, tornando possível a inversão do sentido do carregamento, realizando a recuperação da deformação do provete;

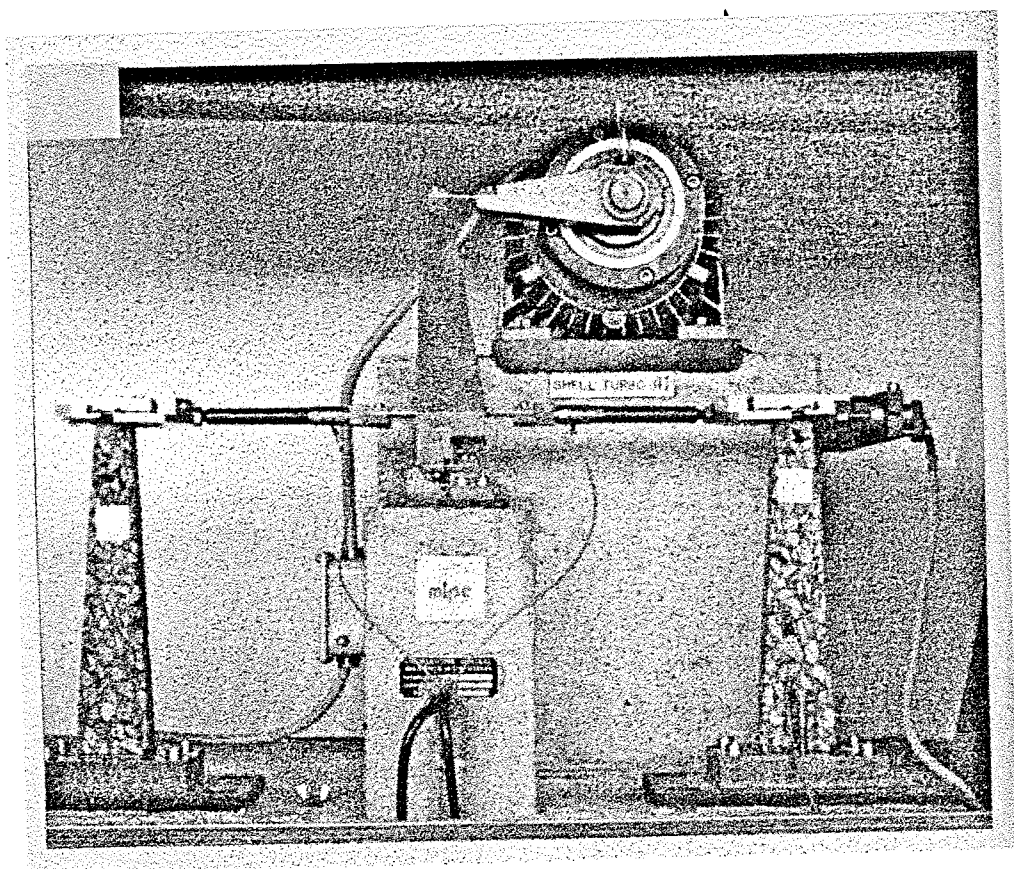


Fig. 2.19 Ensaio de flexão em provete trapezoidal em consola

- Os franceses desenvolveram um equipamento que permite a realização de vários ensaios em simultâneo.

As desvantagens associadas são:

- preparação dos provetes é uma tarefa difícil e muito minuciosa, dada a não ortogonalidade das faces laterais do provete relativamente às bases.
- A dimensão da menor secção transversal do provete possui valores muito reduzidos, sendo provavelmente esta a razão pela qual se verifica uma dispersão de resultados superior à obtida em outros métodos de ensaio. Este aspecto obriga pois à realização de um maior número de ensaios para se conseguir a uma lei de fadiga com exactidão adequada.

2.6 Conclusões

Apesar de a todos os métodos desenvolvidos se poderem associar vantagens e desvantagens, o ensaio de flexão em viga prismática rectangular em quatro pontos em tensão ou extensão controlada é o método actualmente mais utilizado, podendo afirmar-se ser aquele que apresenta, relativamente aos restantes, vantagens mais significativas, das quais podem ser salientadas duas:

- As tensões de tracção instaladas no provete são obtidas por flexão, que está mais de acordo com o fenómeno de fendilhamento por fadiga dos pavimentos;
- Existe uma zona central de momentos constantes pelo a rotura do provete não fica imposta a uma só secção. Este aspecto conduz à obtenção de uma menor dispersão de resultados nos ensaios, permitindo obter o comportamento à fadiga das misturas betuminosas, para um menor número de provetes.

CAPÍTULO III

CAPÍTULO III

PROCEDIMENTO DO ENSAIO DE FLEXÃO SIMPLES POR CARREGAMENTO EM DOIS PONTOS EM EQUIPAMENTO SERVOPNEUMÁTICO

3.1 Introdução

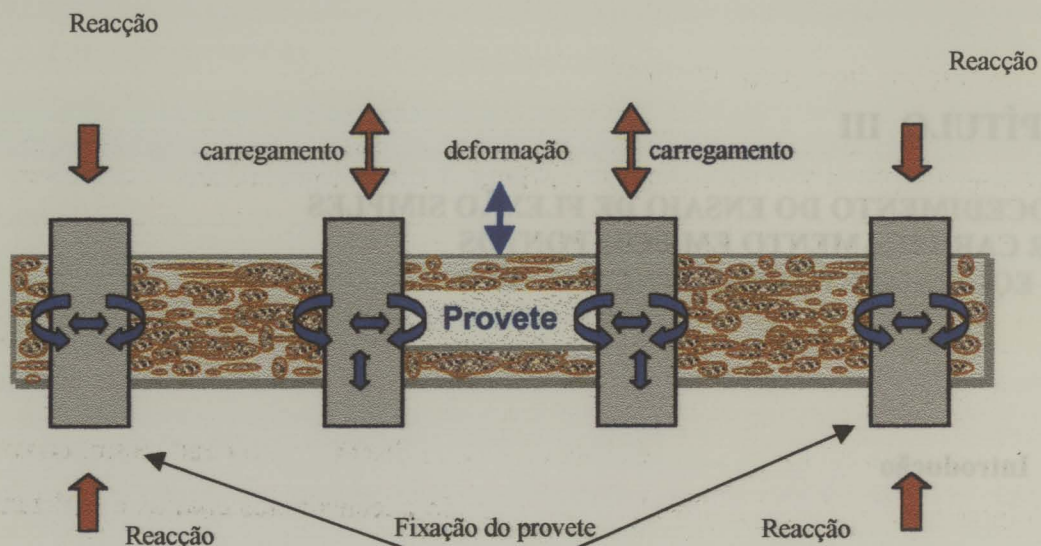
O equipamento utilizado nos ensaios de fadiga apresentados neste trabalho é de origem Australiana e possui a designação de "Beam Fatigue Apparatus". O equipamento foi desenvolvido especificamente para cumprir os requisitos da norma AASHTO TP8 [47] e que resultou do programa SHRP nomeadamente do projecto designado por "Project A-003A" [4].

Trata-se de um equipamento servopneumático capaz de aplicar cargas sinusoidais cíclicas até um valor máximo de 4,5 kN com uma frequência variável entre 0,5 e 10 Hz [48].

O equipamento aplica um carregamento centrado, composto por duas cargas verticais afastadas entre si de um terço do vão da viga, com a acção a desenvolver-se em ambos os sentidos, o que provoca a flexão do provete prismático de mistura betuminosa quer no sentido descendente quer no sentido ascendente, medindo a força máxima aplicada e a deformação máxima verificada na secção do meio vão da viga. O esquema apresentado na figura 3.1 pretende representar o modo de carregamento bem como o funcionamento estrutural da viga durante o ensaio.

O ensaio pode ser realizado em tensão controlada ou em extensão controlada. Em tensão controlada, a força máxima aplicada ao provete é mantida inalterável ao longo de todos os ciclos de carga, realizando o equipamento a leitura da deformação máxima sofrida pela secção do meio vão do provete.

Em extensão controlada é medida a deformação máxima a meio vão do provete, sendo para cada ciclo de carga, ajustado o valor da força máxima aplicada de forma a que o provete experimente sempre a mesma extensão de tracção, previamente definida.



Nota: Na figura está indicado a vermelho o carregamento e reacções e a azul os deslocamentos

Figura 3.1 Esquema de carregamento e funcionamento estrutural do provete

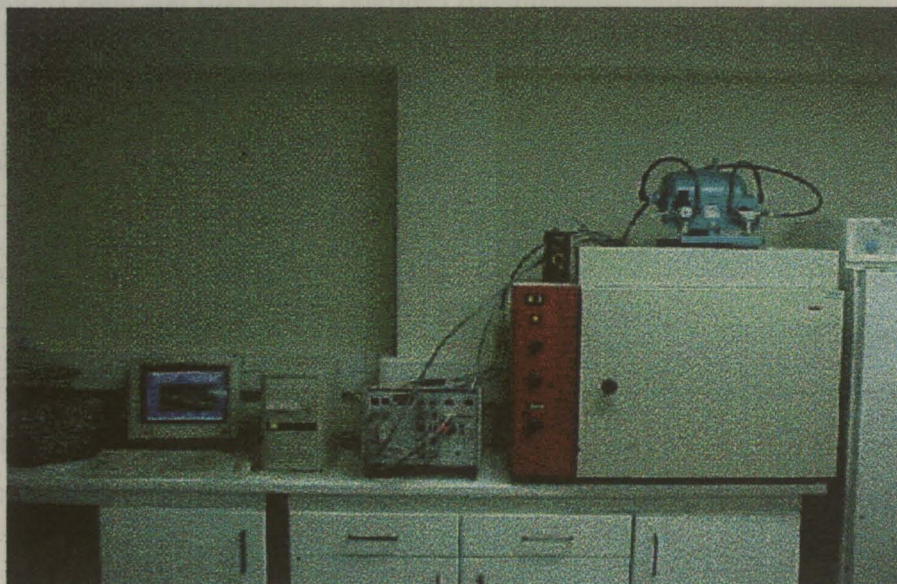


Figura 3.2 Equipamento utilizado na parte experimental

3.2 Descrição do equipamento

O equipamento (fig. 3.2) é basicamente constituído por três componentes principais:

- Um reservatório de ar comprimido;
- Uma estrutura de carregamento;
- Uma unidade de controlo e aquisição das grandezas observadas durante o ensaio.

Para além destes três componentes é ainda necessário dispor de um compressor, capaz de garantir o fornecimento de um caudal de ar comprimido adequado aos ensaios a realizar, um computador, por forma a programar o ensaio, armazenar e tratar os dados provenientes da unidade de aquisição e uma câmara climática de dimensões adequadas para conter a estrutura de carregamento e garantir o controlo da temperatura de ensaio.

3.2.1 Reservatório de ar comprimido

O reservatório de ar comprimido (fig 3.3) tem capacidade para armazenar 5 litros de ar comprimido, e dispõem de uma válvula redutora de pressão, com manómetro graduado de 0 a 10 bares (0 a 1 MPa), capaz de regular a pressão do ar contido no reservatório para o valor pretendido. O reservatório dispõem de dois filtros, que se integram na rede de ar comprimido e que permitem a eliminação, para jusante, da água eventualmente existente na rede de ar comprimido, devida por exemplo à condensação do vapor de água existente no ar. Este aspecto é de importância crucial, devendo ser incluído na manutenção do equipamento, ou mesmo na técnica de ensaio se o ambiente de trabalho for muito húmido, dado que, se a água eventualmente existente na rede de ar comprimido atingir o equipamento, nomeadamente a célula de pressão, pode originar importantes danos ao correcto funcionamento do equipamento. O reservatório dispõem ainda de uma válvula de segurança e um taco que permite retirar todo o seu conteúdo, nomeadamente a água eventualmente retida no seu interior. Uma limpeza periódica ao interior do reservatório deve igualmente fazer parte do procedimento de manutenção do equipamento.

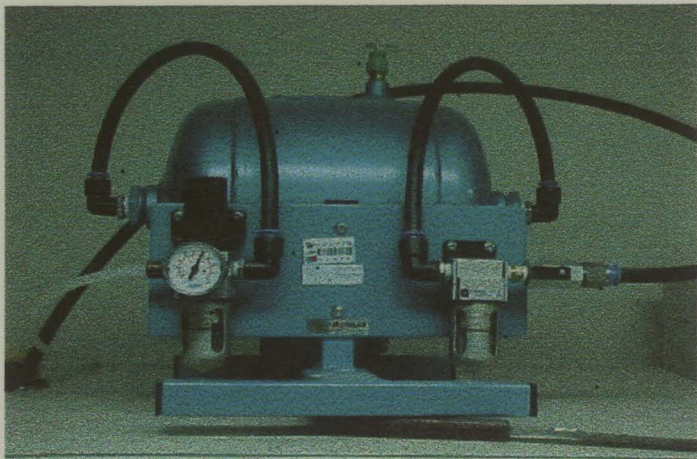


Figura 3.3 - Reservatório de ar comprimido

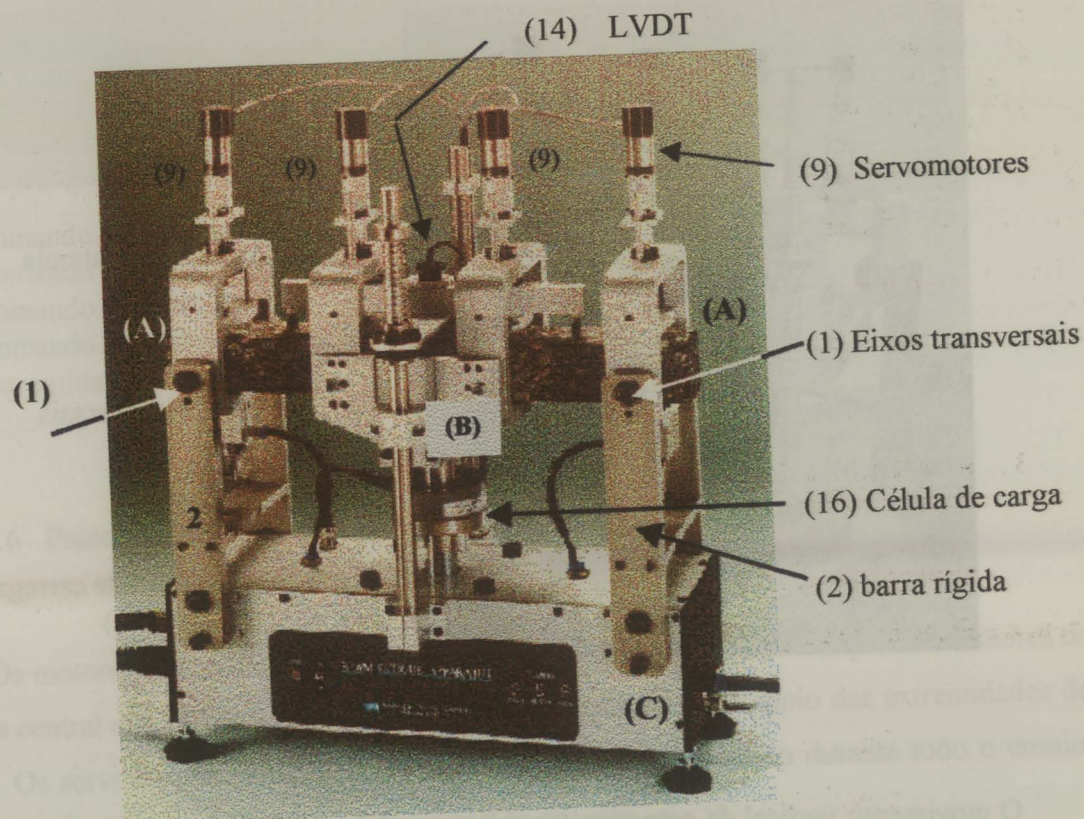
3.2.2 Estrutura de carregamento

A estrutura de carregamento (fig 3.4) permite, não só a fixação do provete, mas também a aplicação de cargas e pode ser considerada constituída por:

- Duas estruturas de apoio das extremidades do provete (A), iguais e posicionadas nos extremos;
- Uma estrutura central de fixação do provete e aplicação de cargas (B);
- Uma base onde se fixam as estruturas anteriores e onde se posicionam os comandos do equipamento (C).

As estruturas de apoio das extremidades do provete e a estrutura central encontram-se ligadas à base da estrutura através de eixos transversais (1) (fig.3.4), que assim funcionam como rótulas, permitindo desta forma, a livre rotação do provete durante o ensaio, segundo o seu eixo longitudinal. Por outro lado, a estrutura central possui pontos para a fixação do provete, centrados e distanciados entre si de um terço da distância entre os apoios extremos. Fica assim garantido o funcionamento estrutural pretendido, ou seja, o de uma viga simplesmente apoiada à qual são aplicadas duas forças verticais, centradas, distanciadas entre si de um comprimento igual a um terço do vão da viga (fig.3.1). As estruturas de apoio estão impedidas de se deslocarem na direcção vertical, através de barras rígidas (2) (fig.3.4),

enquanto que a estrutura central de aplicação de cargas possui liberdade para se deslocar nessa direcção. Quer as estruturas de apoio das extremidades do provete quer a estrutura central possuem barras transversais (3) (fig. 3.5) onde o provete é apoiado na posição inicial do ensaio.

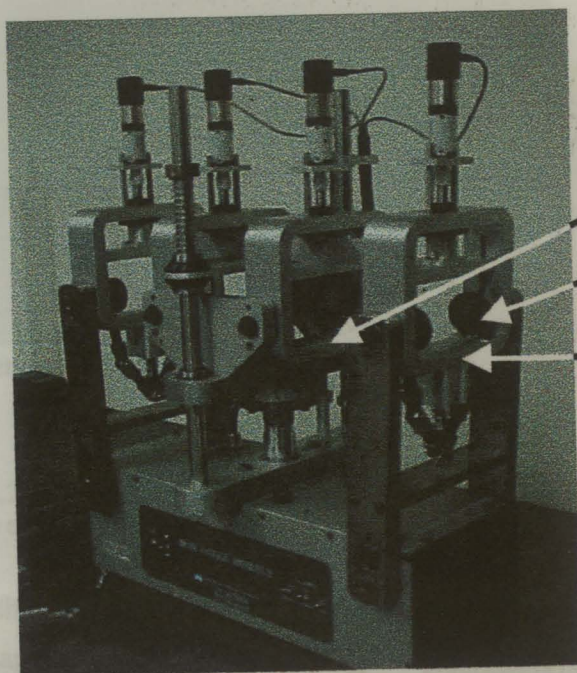


(A) - Estruturas de apoio das extremidades do provete (B) - Estrutura central (C) - Base da estrutura

Figura 3.4 Estrutura de carregamento

Essas barras são fixas no caso das estruturas de apoio das extremidades do provete, ficando assim o provete impedido de se deslocar, nestes pontos, no sentido descendente durante o ensaio, e reguláveis em altura no caso da estrutura central. O equipamento possui na sua base um LVDT (Linear Variable Displacement Transformer) interno que permite posicionar as barras transversais da estrutura central, no plano definido pelas barras transversais das estruturas de apoio das extremidades do provete, permitindo o posicionamento do provete na direcção horizontal no início do ensaio. Este LVDT interno possui um curso de 10 mm e é utilizado apenas para controlar a posição da estrutura central de carregamento. A resposta deste transdutor é não linear pelo que apenas serve para

posicionar a estrutura central no início do ensaio, não devendo pois ser utilizado como equipamento de medida.



(3) barras transversais

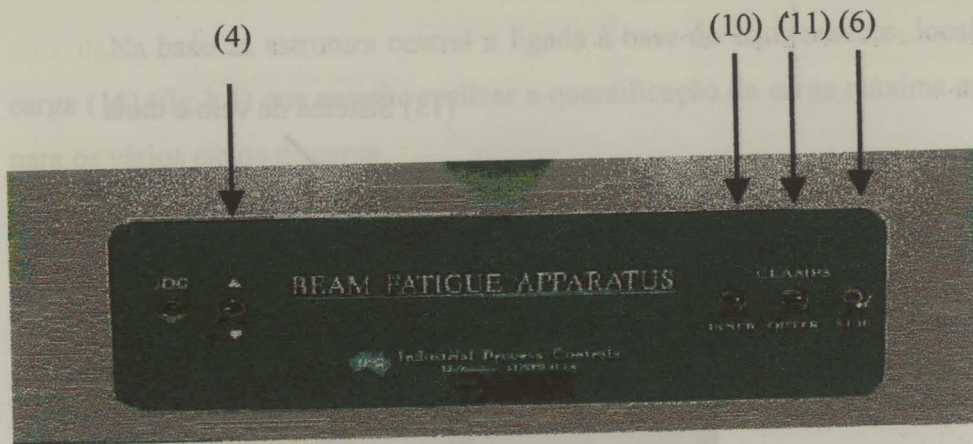
(5) grampos laterais

(3) barras transversais

Fig. 3.5 Estrutura de carregamento
(pormenor)

O movimento vertical da estrutura central, necessário ao posicionamento do provete, é garantido através de um motor eléctrico, comandado pelo interruptor (4) (fig 3.6).

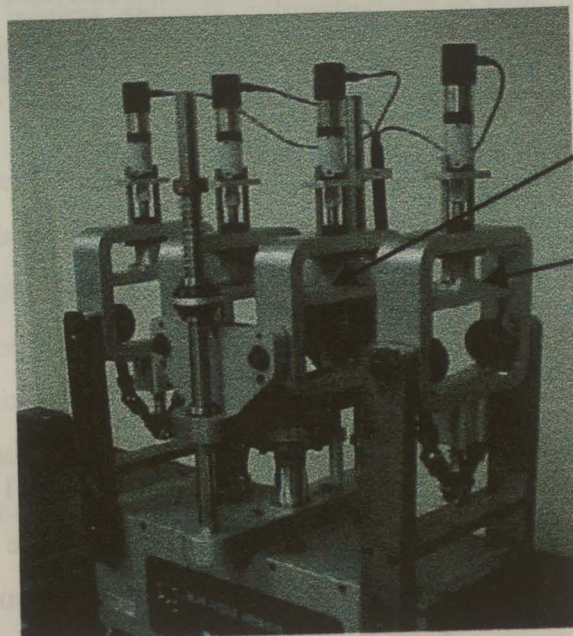
Nas estruturas de apoio das extremidades do provete existem dois grampos laterais (5) (fig. 3.5), accionados pelo interruptor (6) (fig. 3.6), que fazendo uso do ar comprimido fixam lateralmente o provete, posicionando-o correctamente na direcção transversal e impedindo-o de se deslocar durante o ensaio segundo esta direcção. As extremidades do provete estão impedidas de se deslocarem no sentido ascendente durante o ensaio através de barras transversais existentes nas estruturas de apoio das extremidades do provete e que se posicionam sobre o provete (7) (fig.3.7). Estas barras existem também na estrutura central (8) (fig.3.7) que aqui têm o objectivo de, juntamente com as barras inferiores, fixarem o provete, permitindo nessas secções, aplicar as cargas verticais, ascendentes e descendentes, ou seja, tornando possível a inversão do sentido do carregamento. Essas barras são posicionadas de forma automática através de servomotores eléctricos indicados na figura 3.4 através do número (9).



- (4) - comando do movimento vertical da estrutura central
- (6) - comando dos grampos laterais
- (10) - comando dos servomotores da estrutura central
- (11) - comando dos servomotores das estruturas de apoio das extremidades do provete

Figura 3.6 Painel frontal de comandos da estrutura de carregamento

Os motores são accionados através dos interruptores (10) (fig.3.6), para os motores da estrutura central e (11) (fig.3.6) para os motores das estruturas de apoio das extremidades do provete. Os servomotores estão permanentemente em funcionamento durante todo o ensaio, por forma a manter constante a força de aperto do provete.



(8) barras transversais de aperto da estrutura central

(7) barras transversais de aperto das estruturas de apoio das extremidades do provete

Fig. 3.7 Barras transversais de aperto

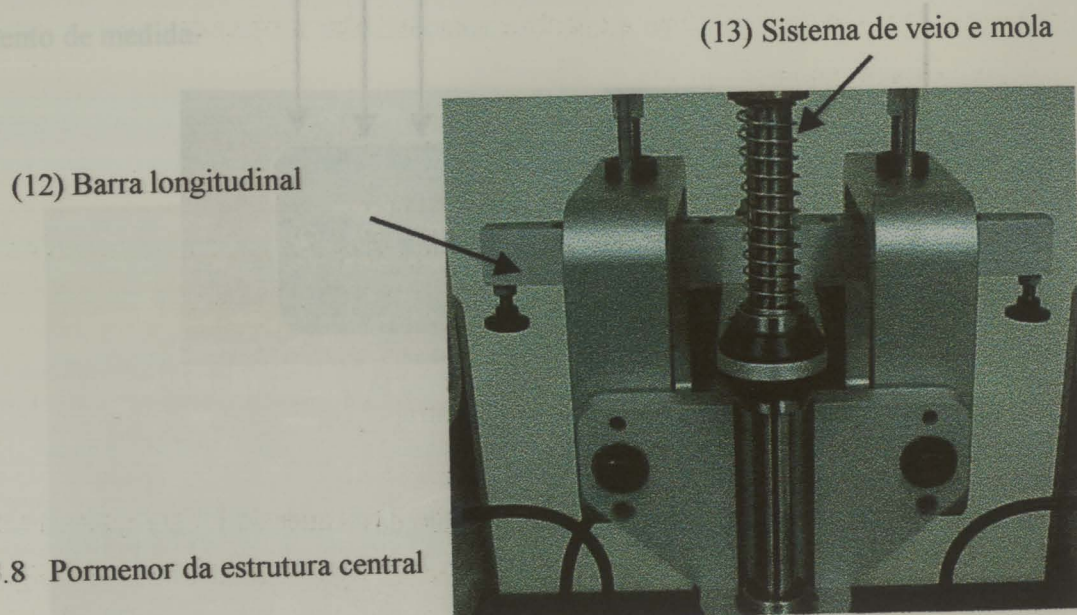


Fig. 3.8 Pormenor da estrutura central

Existe ainda uma barra longitudinal (12) (fig. 3.8), centrada, apoiada sobre o provete em dois pontos distanciados de dois terços do vão do provete, que se desloca verticalmente durante o ensaio, através de um sistema de veios e molas (13) (fig. 3.8) que funcionam praticamente sem atrito.

Colocado nessa barra existe um LVDT (14) (fig.3.4) que quantifica a deformação sofrida, durante o carregamento, pela secção transversal da viga correspondente ao meio vão do provete. Devido ao princípio mecânico da barra e posicionamento do LVDT, o valor da deformada da viga deve ser obtido, multiplicando por dois o valor registado pelo LVDT.

O LVDT possui as seguintes características:

Alcance: $\pm 0,5$ mm
Resolução: $0,25 \mu\text{m}$
Exactidão: $\pm 1,0 \mu\text{m}$

A estrutura de carregamento possui mais duas barras e respectivos eixos (15) (fig.3.12), que são utilizados para colocar correctamente os apoios extremos durante a montagem do provete no equipamento. As barras e os eixos devem ser retirados da estrutura antes do início do ensaio por forma a garantir a livre rotação dos apoios do provete.

Na base da estrutura central e ligada à base do equipamento, localiza-se a célula de carga (16) (fig.3.4) que permite realizar a quantificação da carga máxima aplicada ao provete para os vários ciclos de carga.

Esta célula de carga apresenta as seguintes características:

Alcance: $\pm 4,5$ kN, o que significa que é capaz de aplicar em ambos os sentidos uma força máxima de 4,5 kN;

Resolução: 2,2 N;

Exactidão: ± 10 N.

Conforme será referido no capítulo IV, as características quer do LVDT quer da célula de carga, apresentam valores adequados à determinação da rigidez e ao estudo à fadiga de misturas betuminosas correntes com utilização de betumes correntes.

A deformação máxima verificada a meio vão da viga, foi de cerca de 0,3 mm, o que significa que o LVDT registou um valor cerca de metade deste (0,15 mm), valor muito inferior a 0,5 mm. A deformação mínima registada nos ensaios foi de 0,08 mm (cerca de 0,04 mm lidos pelo LVDT). Os valores da menor divisão e da exactidão do equipamento são portanto adequados aos valores observados nos ensaios.

A carga máxima aplicada aos provetes nos ensaios, correspondente ao valor máximo da extensão, foi de cerca de 2,2 kN, valor muito distante do limite superior. Por outro lado, a força mínima aplicada, correspondente ao valor mínimo da extensão, foi de 0,2 kN, pelo que os valores de 2,2N e 10N, respectivamente para a resolução e exactidão, parecem adequados.

Na base do equipamento está localizada, para além dos interruptores e LVDT interno já mencionados, uma servoválvula, ligada ao actuador, e que permite a aplicação da força previamente definida. O princípio de funcionamento desta válvula, esquematizado na figura 3.9, consiste em receber o caudal de ar comprimido vindo do reservatório de pressão e regulá-lo por forma a reduzi-lo a valores de acordo com a força a aplicar ao provete, rejeitando o restante ar comprimido através de um tubo de escape. A base serve ainda de fixação das estruturas de apoio do provete e estrutura central, e nela se localizam as ligações eléctricas e de ar comprimido necessárias ao sistema.

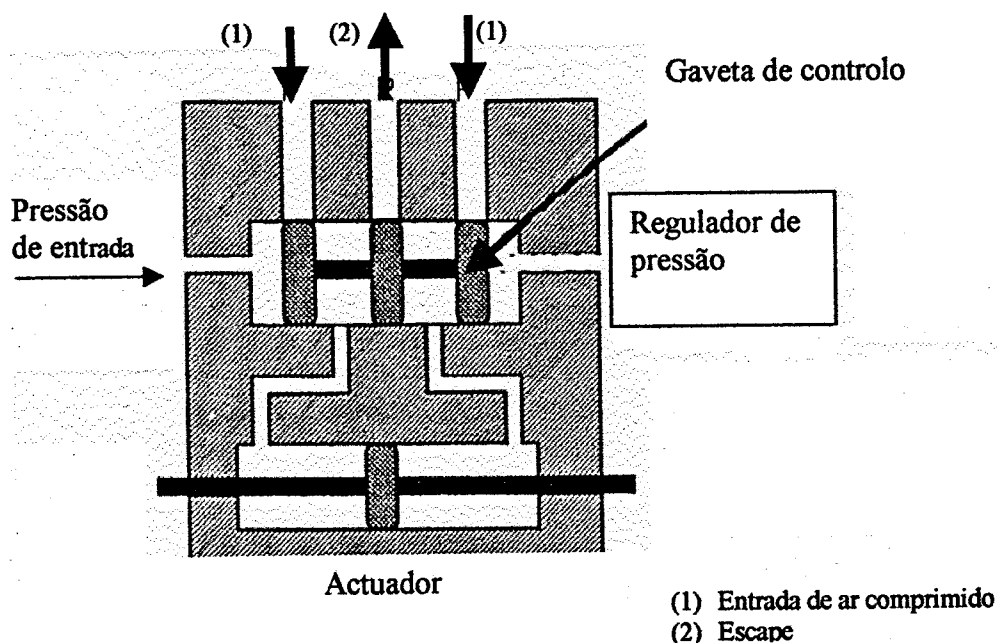


Figura 3.9 Esquema da servoválvula reguladora do ar comprimido

No sistema servopneumático a energia é transmitida ao provete usando uma elevada pressão de ar actuando de ambos os lados do êmbolo do actuador. O actuador é mecanicamente acoplado ao provete através de uma estrutura de reacção. O caudal de ar comprimido é controlado pela servoválvula, dentro da qual pequenas correntes eléctricas são usadas para abrir e fechar o sistema de controlo da válvula.

Na figura 3.10 é representado o sistema de controlo adoptado no equipamento. Os valores observados pelos transdutores, célula de carga e transdutor de deslocamento, são constantemente comparados com os valores pretendidos, previamente definidos, e dessa comparação é dada informação à servoválvula que de ciclo para ciclo vai compensando os desvios verificados entre os valores observados e os valores pretendidos.

3.2.3 Unidade de controlo e aquisição de dados

Este componente do equipamento (fig.3.11) permite realizar o controlo da força aplicada registando o valor da deformação sofrida pelo provete em cada ciclo de carga e o número de ciclos de carga.

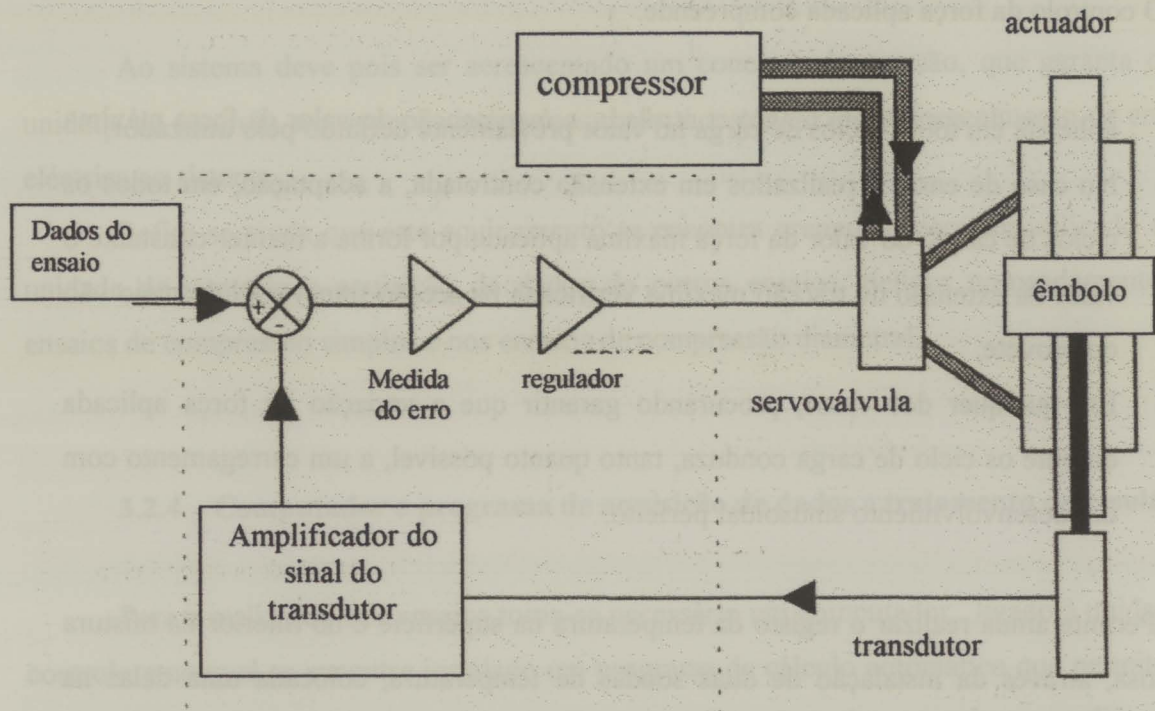


Fig. 3.10 Esquema do princípio de funcionamento do sistema servocontrolado

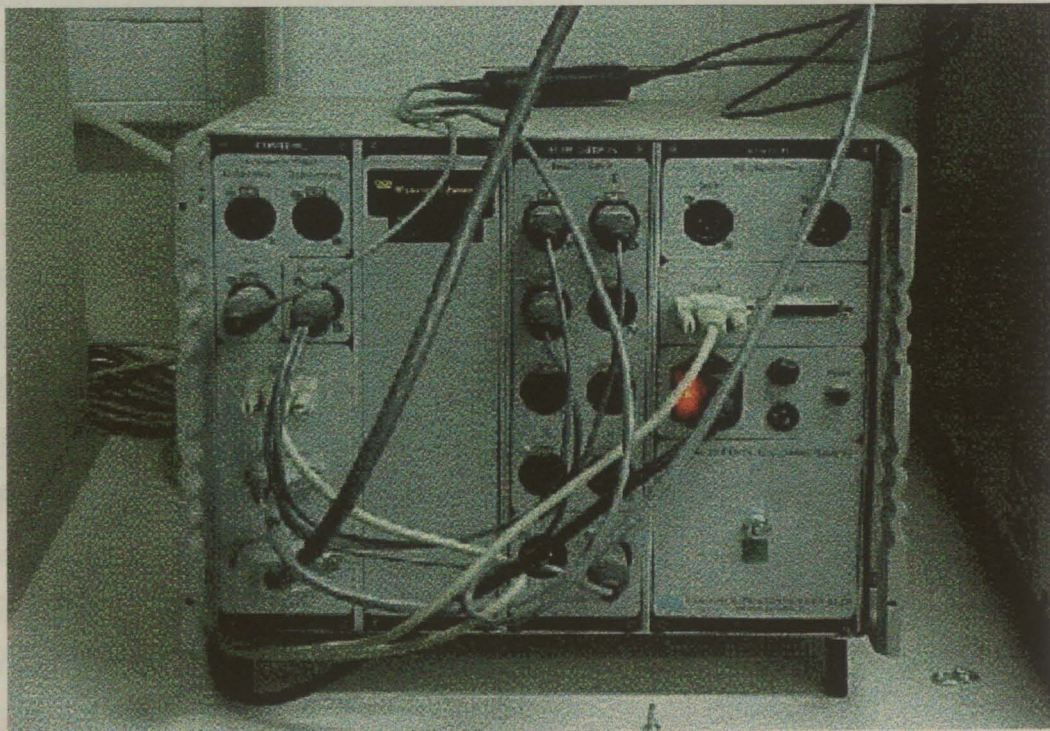


Fig. 3.11 Unidade de controlo e aquisição de dados

O controlo da força aplicada compreende:

- No caso de ensaios em tensão controlada, a manutenção do valor da força máxima aplicada em todos ciclos de carga no valor previamente definido pelo utilizador;
- No caso de ensaios realizados em extensão controlada, a adaptação, em todos os ciclos de carga, do valor da força máxima aplicada por forma a manter constante o valor da extensão de tracção máxima verificada na secção transversal do meio vão do provete;
- Em qualquer dos casos, procurando garantir que a variação da força aplicada durante os ciclo de carga conduza, tanto quanto possível, a um carregamento com um desenvolvimento sinusoidal perfeito.

Permite ainda realizar o registo da temperatura na superfície e no interior da mistura betuminosa, através da instalação de duas sondas de temperatura, colocada uma delas na superfície e a outra dentro de um provete de mistura betuminosa colocado dentro da câmara climática, junto do provete sujeito a ensaio.

A ligação à unidade de controlo dos vários transdutores é realizada através de condutores eléctricos que à semelhança do cabo de alimentação de corrente se posicionam no painel frontal do equipamento. Esses transdutores convertem o movimento mecânico em sinais eléctricos que através da unidade de controlo e aquisição de dados são transformados em linguagem binária que uma vez tratada por um programa de cálculo adequado é convertida em valores matemáticos.

O interruptor para ligar esta unidade encontra-se no painel frontal e deve ser accionado antes de permitir o acesso do ar comprimido à estrutura de carregamento. Na execução dos ensaios da parte experimental foi detectada uma deficiência na concepção do sistema, que no entanto pode ser facilmente corrigida. No caso de se verificar uma falha no abastecimento de energia eléctrica durante a realização de um ensaio, que necessariamente conduz à sua interrupção, quando a energia é restabelecida o interruptor encontra-se na posição de ligado, originando a aplicação ao provete de uma carga instantânea muito elevada que para além de levar o provete à rotura, pode originar danos aos equipamentos nomeadamente ao transdutor de deslocamentos.

Ao sistema deve pois ser acrescentado um conector de pressão, que garanta que a unidade de controlo se encontre desligada quando é restabelecido o fornecimento de energia eléctrica ao sistema.

Refira-se ainda que este equipamento se encontra preparado para ser utilizado como unidade de controlo e aquisição de dados de outros ensaios cíclicos nomeadamente nos ensaios de compressão simples e nos ensaios de compressão diametral.

3.2.4 Computador e programa de aquisição de dados e tratamento de resultados

Para a realização dos ensaios torna-se necessário um computador, ligado à unidade de controlo e no qual se encontre instalado um programa de cálculo automático que permita não só, programar o ensaio mas também realizar o registo de todos os valores medidos pelo equipamento.

A aplicação informática fornecida com o equipamento regista a força aplicada e a deformação vertical da secção central do provete. O registo é realizado, inicialmente, em intervalos de 10 ciclos de carga, passando o intervalo a ser, a partir do ciclo 10^3 , de 20 ciclos e a partir do ciclo 10^5 de 30 ciclos. Durante a execução do ensaio é possível ao utilizador observar, no monitor do computador, e em cada instante, não só a duração do ensaio e o número de ciclos de carga, mas também a deformação da viga, a força instalada, a tensão e a extensão de tracção máxima, a rigidez à flexão, o ângulo de fase, a energia dissipada e a energia dissipada acumulada. Também durante a execução do ensaio podem ser visualizados gráficos que fornecem a variação com o número de ciclos aplicados com as seguintes características: rigidez à flexão, deformação da viga, força aplicada, tensão e extensão de tracção máximas e energia dissipada. Todos estes valores quantificados no ensaio são guardados em ficheiro informático, permitindo o tratamento desses valores após a conclusão dos ensaios. Obtêm-se assim gráficos que evidenciam o comportamento do provete ao longo do ensaio em termos de: deformação do provete, força aplicada, tensão e extensão de tracção máxima, rigidez à flexão, módulo de elasticidade e ângulo de fase.

O programa permite ao utilizador, a configuração dos seguintes parâmetros de ensaio:

- Largura do provete;
- Altura do provete;
- Distância entre pontos de aplicação da carga;
- Duração em microsegundos de cada um dos ciclos de carga;
- Tempo de repouso entre ciclos de carga consecutivos;
- Modo de carregamento, em tensão controlada ou em extensão controlada;
- Valor da tensão de tracção máxima a considerar nos ciclos de carga (para ensaios realizados em tensão controlada) ou, em alternativa, o valor da extensão máxima de tracção a aplicar à secção transversal do meio vão em todos os ciclos de carga (para ensaios realizados em extensão controlada);
- Valor do coeficiente de Poisson;
- Número de ciclos ao fim dos quais deve ser considerado o valor da rigidez da mistura betuminosa como rigidez inicial;
- Indicação do valor da rigidez para o qual o ensaio termina;
- Indicação do número máximo de ciclos de carga a aplicar ao provete no ensaio.

Para além destes valores torna-se necessário introduzir a referência do provete e a identificação do ficheiro para onde serão enviados, no final do ensaio, os valores obtidos.

3.2.5 Compressor

O equipamento de fadiga descrito neste capítulo é do tipo servopneumático pelo que necessita de uma fonte de ar comprimido para o seu funcionamento. O ar comprimido para além de ser responsável pela acção mecânica que materializa a força aplicada ao provete actua também sobre os grampos que fixam lateralmente o provete.

O compressor deve garantir o fornecimento de ar com 800 kPa de pressão. Se o valor da pressão do ar for inferior pode o equipamento não ser capaz de produzir a força necessária para o ensaio. O compressor deve possuir filtros adequados para que, à semelhança do que

ficou dito no caso do reservatório de ar comprimido, a água condensada não se introduza na rede de ar comprimido e para que retenha a entrada de impurezas de dimensões superiores a 0,3 μm . Sempre que o equipamento não esteja a ser utilizado deve ser mantida o passador de corte fechado.

De acordo com a normalização dos ensaios de determinação da rigidez [42] e comportamento à fadiga de misturas betuminosas [47] os ensaios devem ser realizados a uma frequência de aplicação de cargas de 10 Hz. Devido ao funcionamento da servovalvula atrás descrito, verificou-se experimentalmente (ver capítulo IV), que para aqueles valores de frequência, o consumo de ar comprimido é bastante elevado. Por este facto recomenda-se a utilização de um compressor de elevada capacidade de armazenamento e de grande potência. Um equipamento com um reservatório de 100 litros e com uma pressão máxima regulável de 12 bares (1,2 MPa) parece-nos indicado, nomeadamente quando se pretende realizar ensaios para extensões de tracção muito baixas, o que conduz a ensaios de longa duração.

O compressor deve ser instalado relativamente afastado do equipamento de ensaio, não só devido ao ruído provocado, mas também por forma a que as vibrações provocadas pelo funcionamento do compressor não interfiram com os sinais eléctricos originados nos ensaios.

Recomenda-se ainda a utilização de filtros e a implementação de trabalhos de manutenção com periodicidade adequada, em função do número de horas de utilização, que incluam a limpeza de filtros, evacuação da água eventualmente existente dentro do depósito, verificação do funcionamento do sistema de refrigeração e dos componentes eléctricos, como o pressostato, bem como a substituição do óleo de lubrificação do motor eléctrico.

3.2.6 Câmara climática

Por forma a garantir determinada temperatura de ensaio, deve ainda dispor-se de uma câmara climática com sistema de refrigeração e com uma pequena abertura para o exterior para a passagem dos cabos eléctricos e condutas de ar comprimido. A câmara deve dispor de uma porta de vidro interna para que o ensaio possa ser acompanhado e as suas dimensões devem ser adequadas não só às dimensões do equipamento mas permitindo também que este rode dentro da câmara para que possa ser colocado e retirado o provete sem ser necessário retirar a estrutura.

Na figura 3.12 está representada a estrutura de carregamento colocada no interior da câmara climática durante a realização de um ensaio de fadiga.

As suas características técnicas devem estar de acordo com o seguinte:

- Gama de temperatura: 10 a 60 °C
- Resolução : 0,1 °C
- Exactidão : 0,5 °C

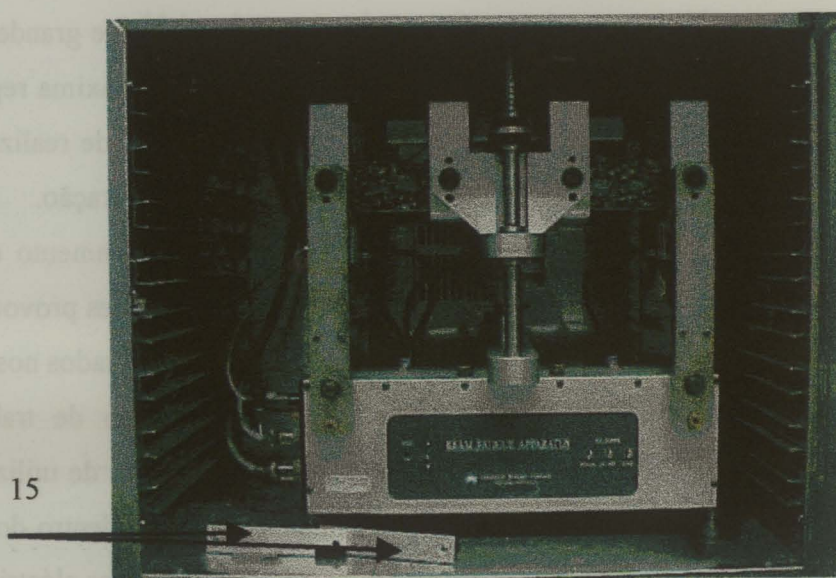


Fig. 3.12 - Câmara climática e estrutura de carregamento

3.3 Características obtidas nos ensaios

A unidade de controlo e aquisição de dados permite o registo e o cálculo de uma série de características, armazenando-as num ficheiro de resultados. A aplicação de cálculo automático que acompanha o equipamento, realizada em EXCEL do sistema operativo Windows, permite fazer o tratamento desses resultados obtendo-se para os ciclos de carga armazenados, os valores das seguintes características [48]:

A. Máxima tensão de tracção verificada na secção do meio vão do provete:

$$\sigma_{tMm} = 3000 \cdot a \cdot P / (b \cdot h^2) \quad (\text{kPa}) \quad (3.1)$$

onde :

a - Distância entre pontos de aplicação da carga, ou seja um terço do vão da viga e que no equipamento utilizado tem o valor de 118,5 mm.

P - Força aplicada ao provete (N), valor quantificado pela célula de carga.

b - largura do provete (mm).

h - Altura do provete (mm).

B. Máxima extensão de tracção

$$\epsilon_{tMm} = 12 \cdot \delta \cdot h / (23 \cdot a^2) \quad (\text{mm/mm}) \quad (3.2)$$

onde:

δ - deformação sofrida pela viga na secção do meio vão (mm), valor quantificado pelo LVDT.

C. Rigidez da mistura betuminosa

$$E_m^* = \sigma_{tMm} / (1000 \cdot \epsilon_{tMm}) \quad (\text{MPa}) \quad (3.3)$$

D. Módulo de elasticidade

$$E_m^{**} = P \cdot a / (\delta \cdot b \cdot h) \cdot [23 \cdot a^2 / (4 \cdot h^2) + k \cdot (1 + \nu)] \quad (\text{MPa}) \quad (3.4)$$

onde:

k - cociente entre a resistência ao corte no ciclo de carga e a média da resistência ao corte observada nos ciclos de carga anteriores; o valor de k é no entanto considerado constante e igual a 1,5;

v - Coeficiente de Poisson.

Nesta expressão entende-se por módulo de elasticidade da mistura betuminosa o valor da rigidez da mistura, ou seja o quociente entre a tensão de tracção instalada e a respectiva extensão, corrigido de uma parcela para ter em conta as deformações devidas ao esforço transversal aplicado na secção.

E. Ângulo de fase

$$\varnothing_m = 360 \cdot f \cdot s \quad (\text{graus}) \quad (3.5)$$

onde:

f - frequência do carregamento (Hz)

s - atraso da extensão relativamente à tensão (segundos)

F. Energia dissipada por ciclo de carga

A energia dissipada por ciclo de carga é calculada, em kPa, determinando a área dentro do ciclo de histerese da tensão-extensão para cada ciclos de carga. A energia dissipada, cujo significado físico foi já referido no capítulo I e que diz respeito à componente imaginária do módulo de rigidez da mistura betuminosa, varia em função do tipo e do modo de carregamento, verificando-se, com o número de aplicações de carga, um aumento se o ensaio é realizado em tensão controlada e uma diminuição se o ensaio é realizado em extensão controlada.

Para um carregamento do tipo sinusoidal, a expressão que permite calcular a energia dissipada por ciclo de carga é dada pela seguinte expressão:

$$W_{dcfm} = \pi \cdot \sigma_{tmi} \cdot \epsilon_{tmi} \cdot \sin \phi_{mi} \quad (\text{kPa}) \quad (3.6)$$

G. Energia dissipada acumulada

A energia dissipada acumulada até à rotura é considerada como o somatório da energia dissipada por ciclo de carga e pode ser calculada como a área entre a curva de energia dissipada por ciclo de carga e o número de ciclos de carga até à rotura, e toma, para um carregamento do tipo sinusoidal a seguinte expressão:

$$W_{dafm} = \sum_{i=1}^{N_f} \pi \cdot \sigma_{tmi} \cdot \epsilon_{tmi} \cdot \sin \phi_{mi} \quad (\text{kPa}) \quad (3.7)$$

em que:

N_f - número de ciclos de carga até à rotura;

W_{dafm} - energia dissipada acumulada pelo provete até à rotura.

A lei que estabelece a relação entre a energia dissipada acumulada e a resistência à fadiga de uma mistura betuminosa é dada pela seguinte expressão:

$$W_{dafm} = A \cdot (N_f)^z \quad (3.8)$$

em que:

A e z são constantes obtidas experimentalmente.

Após o início do ensaio, e no decorrer do ensaio, o utilizador pode escolher, para visualização no monitor do computador, vários gráficos que caracterizam, ao longo do ensaio, a evolução das seguintes características:

- Rigidez;
- Deformação da secção do meio vão do provete;
- Amplitude da força aplicada ao provete;
- Amplitude da tensão de tracção;
- Amplitude da extensão de tracção;
- Energia dissipada;
- Temperatura da mistura betuminosa, interior e à superfície;
- Ângulo de fase;
- Módulo de elasticidade.

Os parâmetros obtidos ao longo do ensaio são fornecidos ao utilizador no monitor do computador, cada 10 ciclos de carga aplicados, sendo os valores armazenados periodicamente com base numa evolução logarítmica, ou seja para ciclos menos afastados no início do ensaio, passando gradualmente a aumentar o espaçamento entre ciclos de carga com o evoluir do ensaio.

As grandezas medidas e calculadas pelo equipamento e descritas no monitor durante a execução do ensaio e constantemente actualizadas de 10 em 10 ciclos são:

- Duração do ensaio;
- Força máxima aplicada ao provete;
- Deformação máxima verificada a meio vão do provete;
- Tensão de tracção máxima;
- Extensão de tracção máxima;
- Temperatura superficial e no interior da mistura betuminosa;
- Número de ciclos aplicados desde o início do ensaio;
- Rigidez;
- Ângulo de fase;
- Módulo de elasticidade;
- Energia dissipada em cada ciclo;
- Energia dissipada acumulada.

A aplicação informática permite obter no monitor do computador os valores dos parâmetros de ensaio considerados, os valores observados no último ciclo de carga e apresenta os resultados armazenados para cada ciclo de carga registado:

- Número do ciclo de carga;
- Máxima força aplicada ao provete;
- Deformação da secção do meio vão da viga;
- Máxima tensão de tracção;
- Máxima extensão de tracção;
- Rigidez;
- Ângulo de fase;
- Módulo de elasticidade;
- Energia dissipada;
- Temperatura da mistura verificada à superfície.

3.4 Técnica de ensaio

A técnica de ensaio é definida através da norma AASHTO TP8 [47] e o equipamento é fornecido com os parâmetros de ensaio pré-definidos de acordo com aquele documento normativo, podendo no entanto o utilizador fazer variar alguns desse parâmetros. Os provetes utilizados nos ensaios possuem forma prismática com 380 mm de comprimento, 63 mm de largura e 50 mm de altura e podem ser obtidos por moldagem em laboratório ou por corte do pavimento.

Antes de serem colocados no equipamento, os provetes devem ser convenientemente limpos e medidos. As dimensões da secção transversal a considerar devem ser obtidas como os valores médios das dimensões medidas em três secções transversais: a secção do meio vão e mais duas outras afastadas dos apoios de um terço do comprimento do provete. De seguida devem ser colocados durante 2 horas num ambiente que garanta a temperatura de $20 \pm 0,5$ °C.

Após este período o provete é colocado no equipamento, de forma centrada e de modo a que a sua superfície inferior entre em contacto não só com os dois apoios extremos mas também com os dois apoios centrais. Para isso torna-se necessário utilizar o interruptor (4) (fig.3.6) que movimenta verticalmente a estrutura central, por forma a colocar os quatro

apoios no mesmo plano horizontal. De seguida fixa-se o provete transversalmente através do interruptor (6) (fig.3.6) e baixam-se as barras transversais de aperto extremas e centrais, respectivamente (7) e (8) (fig.3.7), actuando nos interruptores (11) e (10) (fig. 3.6).

LVDT (14) (fig.3.4) deve agora ser posicionado de forma a que, na posição inicial do provete, o pistão esteja localizado a metade do curso, de forma a que possa acompanhar o deslocamento vertical ascendente e descendente do provete.

O ensaio só deve ter início após ficar garantido que o provete se encontra à temperatura de ensaio pretendida e nunca antes 10 minutos após a fixação do provete. Este período de repouso tem por objectivo permitir a dissipação das tensões geradas pela fixação do provete ao equipamento.

Os ensaios são realizados para extensão controlada, sendo o carregamento do tipo sinusoidal com uma frequência de 10 Hz e para uma temperatura igual à temperatura considerada no dimensionamento do pavimento.

Os ensaios de fadiga devem ser conduzidos até à ruína do provete, que como já ficou dito, deve ser considerado, no caso de ensaios em extensão controlada, o ciclo de carga para o qual o valor da rigidez da mistura betuminosa se reduz a metade do valor dessa mesma característica no início. O equipamento vem pré-programado para considerar como rigidez inicial o valor da rigidez da mistura betuminosa verificado no quinquagésimo ciclo de carga e para o ensaio terminar quando esse valor se reduzir a metade. No entanto estas condições podem ser alteradas pelo utilizador, alterando estes parâmetros quando estão a ser introduzidos na aplicação informática as características do ensaio.

Refira-se que o tempo que medeia a preparação dos provetes e a realização dos ensaios de fadiga deve ser o menor possível. Neste período os provetes devem ser armazenados de forma a que fiquem totalmente apoiados, mas nunca uns sobre os outros e mantidos num ambiente que garanta uma temperatura inferior a 5 °C e uma humidade relativa do ar inferior a 65 °C. Este é um problema que deve ser ponderado antes de se dar início à preparação dos provetes, pois a determinação da lei de fadiga de uma mistura betuminosa requer a realização de muitos ensaios de fadiga, e portanto a necessidade de recorrer a inúmeros provetes. As condições de armazenamento podem no entanto colocar problemas de espaço, pelo que deve ser ponderada a hipótese de os provetes serem preparados de uma forma faseada, função da evolução dos ensaios de fadiga.

Por fim refira-se que para se obter uma lei de fadiga de uma mistura betuminosa com elevada exactidão, torna-se necessário realizar ensaios para valores da extensão máxima de

tracção muito baixos, de preferência muito perto dos valores de cálculo observados na camada no dimensionamento da mistura betuminosa. No entanto ensaios realizados para extensões tão baixas tornam-se muito morosos, chegando mesmo a durar vários dias, o que faz aumentar o risco de ocorrer um corte de energia eléctrica durante a realização desses ensaios.

Este aspecto implica que seja de todo conveniente dispor de um gerador que garanta o fornecimento ininterrupto de energia eléctrica não só ao equipamento, mas também ao computador e ao gerador de ar comprimido.

CAPÍTULO IV

CAPÍTULO IV

AVALIAÇÃO DA VIDA À FADIGA DE UMA MISTURA BETUMINOSA

4.1 Introdução

Este capítulo pretende fazer a apresentação da metodologia utilizada na quantificação da vida à fadiga de uma mistura betuminosa, bem como os resultados obtidos nesse estudo. A mistura betuminosa diz respeito ao material utilizado na camada de macadame betuminoso do pavimento incluído no projecto de execução do 2º sublanço IC 25 - Via Rápida de Gondomar, entre as cidades do Porto e Gondomar.

Os provetes de ensaio foram obtidos por serragem de placas, extraídas do material já colocado na camada de base em macadame betuminoso da obra referenciada por " IC 25 - Via Rápida de Gondomar", que à data de início deste trabalho se encontrava em fase de construção.

Os ensaios foram realizados para quatro misturas distintas, fazendo variar duas características, percentagem em betume e porosidade, precisamente aquelas para as quais se considera ser mais provável verificar essa variação durante a execução da obra. Assim, relativamente à mistura formulada para aplicação em obra, referenciada por "macadame compactação corrente", doravante designada por MCC, foram ainda ensaiadas mais três misturas, uma com menor grau de compactação, referenciada por "macadame menor compactação", MMC, outra com uma percentagem de betume superior em cerca de 1%, referenciada por "macadame com percentagem superior de betume", MPS e outra ainda com uma percentagem de betume inferior em cerca de 1%, referenciada por "macadame com percentagem inferior de betume", MPI.

Ao longo desta apresentação será dada especial atenção às relações obtidas nos ensaios, entre as extensões de tracção instaladas nos provetes e as principais características das misturas betuminosas ensaiadas, nomeadamente a vida à fadiga e a rigidez, bem como a adequabilidade do equipamento, à caracterização das propriedades à fadiga de misturas betuminosas correntemente utilizadas em Portugal.

Pretende também esta parte experimental proceder à avaliação da forma como a variação da percentagem em betume e da porosidade da mistura betuminosa, influencia o comportamento à fadiga da mistura colocada no pavimento.

4.2 Breve descrição da obra

A obra em estudo diz respeito ao 2º lanço do Itinerário Complementar IC 25, cujo traçado tem início na Estrada da Circunvalação do Porto, junto ao Nó do Freixo, e termina na actual estrada de D. Miguel na cidade de Gondomar [49]. O traçado deste 2º lanço do IC 25, designado por Via Rápida de Gondomar, possui uma orientação predominante de NW/SE e tem uma extensão total, incluindo os restabelecimentos, de cerca de sete quilómetros.

A velocidade de projecto da via, considerada para definição dos valores mínimos dos elementos do traçado, é de 80 km/h e possui características de via rápida, pelo que não apresenta ligações de nível, estando prevista a sua total vedação lateral.

As curvas circulares em planta apresentam raios com valores que variam entre 300 e 1000 m, sendo os valores dos parâmetros das clotoides de transição variáveis entre 180 e 400 m.

Os traneis que constituem o perfil longitudinal da via possuem inclinação suave, sendo de 4% o valor mais gravoso e para um trainel de apenas 300 m de desenvolvimento. As curvas verticais de concordância possuem raios cujos valores variam entre 6.000 e 20.000 m.

O perfil transversal tipo é constituído por duas faixas de rodagem, com separador central de 4,0 m de largura total, iguais, constituída cada uma delas por duas vias com 3,5 m de largura cada. As bermas exteriores possuem 3,0 m de largura cada, sendo de 1,0 m a largura das bermas interiores adjacentes ao separador central.

O traçado desenvolve-se numa zona com uma morfologia caracterizada por um relevo pouco acidentado a cotas relativamente baixas, entre os 50 e os 120 m.

A zona atravessada pela via é, em termos climáticos, caracterizada por um clima temperado e húmido com forte influência atlântica. A temperatura média do ar é de 9 °C para o mês mais frio, Janeiro, e de 20 °C em Julho, o mês mais quente, sendo a variação térmica anual da ordem dos 10,5 °C. A humidade relativa do ar é elevada, atingindo frequentemente valores superiores a 70 %.

Os aterros e as escavações a realizar não apresentam grande envergadura, sendo de cerca de 11 e 15 m, a altura máxima dos aterros e das escavações, respectivamente.

Os materiais resultantes das escavações são fundamentalmente solos residuais graníticos e alguns solos residuais de xisto. Os materiais apresentam, de uma forma geral, características adequadas para serem utilizados quer no corpo dos aterros quer na camada de leito do pavimento. O facto de o volume de materiais resultantes da escavação ser superior ao volume de materiais necessários à execução do corpo dos aterros e da camada de leito do pavimento, permite realizar a selecção dos materiais a empregar, rejeitando-se os saibros mais caulinizados e os solos residuais de xisto que apresentam elevada percentagem de finos. Para a camada de leito do pavimento foram usados os saibros com melhores características mecânicas.

As principais entidades envolvidas neste empreendimento são [50]:

- Dono do empreendimento: ICOR Instituto para a Construção Rodoviária;
- Projectista principal: COBA;
- Construtor: Consórcio Soares da Costa S.A. e Jaime Ribeiro e Filhos, S.A..

4.3 Dimensionamento do pavimento

4.3.1 Metodologia utilizada no dimensionamento

O correcto dimensionamento das camadas de base de um pavimento reveste-se da maior importância, não devendo ser considerados apenas os aspectos técnicos, uma vez que os aspectos económicos são determinantes, dado os elevados volumes dos materiais constituintes destas camadas, relativamente à camada de desgaste [51].

O dimensionamento do pavimento foi realizado com recurso a metodologias racionais. Estes métodos têm por base critérios de dimensionamento idênticos aos utilizados noutras estruturas da engenharia e compreendeu as seguintes etapas:

1º - Análise do estudo do tráfego e quantificação do tráfego pesado acumulado desde a entrada da infra-estrutura em serviço até ao ano horizonte.

2º - Análise do estudo geológico e geotécnico, para definição do tipo de pavimento mais adequado face às características dos terrenos interessados e dos materiais disponíveis.

3º - Definição dos materiais a empregar no pavimento e sua fundação, nomeadamente solos e agregados. Neste ponto é considerado o estudo geológico e geotécnico de modo a averiguar da possibilidade de utilização dos materiais escavados, nas diferentes camadas do pavimento, bem como o levantamento de possíveis zonas de empréstimo e de pedreiras da região.

4º - Concepção da estrutura do pavimento, identificando as várias camadas, materiais constituintes, espessuras e propriedades dos materiais.

5º - Definição das temperaturas de cálculo a que vão estar sujeitos os materiais das camadas ligadas com betume.

6º - Obtenção dos valores das propriedades mecânicas dos materiais.

7º - Definição dos critérios de dimensionamento, nomeadamente comportamento à fadiga e às deformações permanentes.

8º - Cálculo dos estados de tensão instalados nos materiais das diferentes camadas do pavimento, devidos ao tráfego, em termos de extensões verticais de compressão e horizontais de tracção.

9º - Verificação da compatibilidade dos valores obtidos com os valores indicados pelos critérios de dimensionamento, nomeadamente relacionando a extensão máxima de compressão no topo da fundação com o comportamento às deformações permanentes e as extensões máximas de tracção na base das camadas betuminosas com o comportamento das misturas à fadiga.

No caso de não serem satisfeitos os critérios de dimensionamento, este deve ser retomado com a concepção de nova estrutura para o pavimento, em termos de espessuras e/ou número de camadas, ou mesmo a alteração do tipo de materiais a adoptar. Caso contrário, devem ainda ser estudadas outras hipóteses que possam contribuir para a adopção de uma solução globalmente mais económica.

O dimensionamento do pavimento foi realizado considerando a abertura da via ao tráfego no ano de 1997 e fixando 20 anos como horizonte de projecto, ou seja um ano horizonte de 2017. O estudo do tráfego conduziu a um valor do tráfego acumulado no ano horizonte de $38,18 \times 10^6$ eixos padrão de 80 kN cada.

A temperatura de cálculo das misturas betuminosas constituintes das várias camadas do pavimento foram estimadas a partir do valor ponderado da temperatura do ar, através da metodologia proposta pela SHELL, tendo sido obtido os seguintes valores:

- | | |
|---|-------------------------------------|
| - Camada de desgaste em betão betuminoso | $T = 23,7 \text{ }^{\circ}\text{C}$ |
| - Camada de regularização em betão betuminoso | $T = 23,0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ |
| - Camada de base em macadame betuminoso | $T = 22,0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ |

No dimensionamento do pavimento foram consideradas para o betume e para a mistura de macadame betuminoso constituinte da camada de base, as seguintes características [50]:

A - Betume

- Rigidez $E_b^* = 28 \text{ MPa}$

Este valor foi obtido pela aplicação da expressão (1.7) apresentada no capítulo I, considerando:

$$V = 70 \text{ km/h, a que corresponde um } t = 1/V = 0,0143 \text{ s}$$

$$IP = -0,3267$$

$$T_{ab} = 54,6 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T = 22,0 \text{ }^\circ\text{C}$$

B - Mistura betuminosa

- Massa volúmica aparente da mistura compactada $\rho = 2,375 \text{ g/cm}^3$
- Percentagem ponderal de betume $P_b = 4,4 \%$
- Percentagem volumétrica de betume $V_b = 10,0 \%$
- Porosidade da mistura betuminosa $V_v = 5\%$
- Vazios da mistura de agregados $VMA = 15\%$
- Percentagem volumétrica de agregado $V_a = 85\%$
- Rigidez da mistura betuminosa $E_m^* = 4\,800 \text{ MPa}$
- Coeficiente de Poisson $\nu = 0,35$

No dimensionamento do pavimento foi considerado para critério de dimensionamento à fadiga, a expressão proposta pela SHELL, já apresentada neste trabalho (1.14). Essa mesma expressão pode tomar a seguinte forma:

$$\epsilon_{lm} = (0,856 \cdot V_b + 1,08) \cdot E_m^{*-0,36} \cdot N_f^{-0,2} \quad (4.1)$$

4.3.2 Estrutura do pavimento

A estrutura projectada para o pavimento da via é constituída por uma camada de sub-base em material britado de granulometria extensa com 0,30 m de espessura, uma camada de base em macadame betuminoso com 0,14 m, uma camada de regularização com 0,08 m e uma camada de desgaste com 0,06 m ambas em betão betuminoso (fig. 4.1) [50].

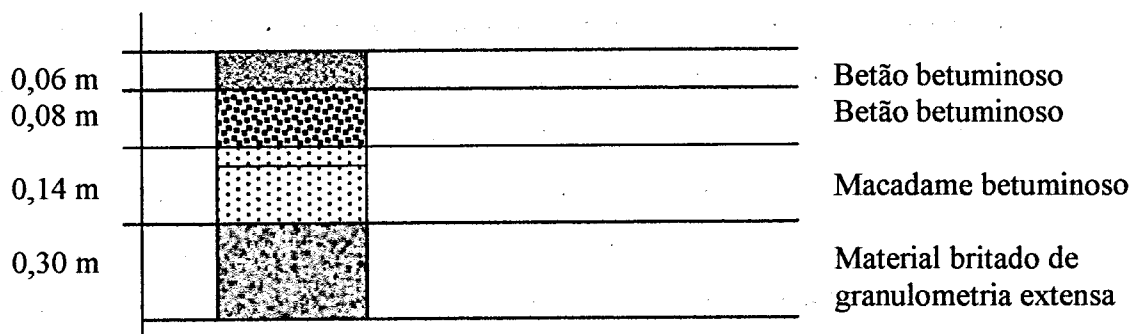


Fig. 4.1 Representação esquemática do pavimento betuminoso do 2º Lanço do IC 25

4.4 Formulação do macadame betuminoso usado em obra

O macadame betuminoso a aplicar na camada de base do pavimento, constitui uma mistura betuminosa obtida pela adição e homogeneização em central, de um betume com um conjunto de agregados devidamente caracterizados e doseados.

O caderno de encargos da obra define todas as características que os materiais devem observar, nomeadamente no que diz respeito aos agregados, betume e mistura betuminosa.

4.4.1 Características dos agregados e do filer

No que diz respeito às características físicas e mecânicas dos agregados empregues na mistura betuminosa, o caderno de encargos da obra define os seguintes comportamentos:

- Percentagem de material britado , mínima 80%
- Perda por desgaste na máquina de Los Angeles (granulometria G) [52], máxima 35%
- Índices de lamelação [53] e alongamento [54], máximos 30%
- Equivalente de areia da mistura de agregados [55], mínimo 50%
- Limite de liquidez e índice de plasticidade [56] NP

O caderno de encargos define ainda a granulometria a observar pela mistura de agregados, através do fuso definido no Quadro IV.1. As características da mistura de

agregados definidas na publicação " Misturas betuminosas - Contribuição para a normalização do fabrico e da aplicação" da APORBET [57], para macadame betuminoso com características de base, para o fuso granulométrico B, coincidem com as definidas no caderno de encargos da obra, nomeadamente no que diz respeito à granulometria, perda por desgaste, equivalente de areia e índices de lamelação e alongamento, não fazendo exigências quanto ao limite de liquidez e índice de plasticidade e acrescentando as seguintes condições:

- Valor azul de metileno [58] (material de dimensão inferior a 75 m),
máximo 0,8
- Absorção de água para cada uma das fracções granulométricas
componentes [59] [60], máxima 3%

Quadro IV.1 Fuso granulométrico exigido para a mistura de agregados

Abertura dos peneiros ASTM (mm)	Percentagem acumulada do material que passa (%)
37,5	100
25,0	87 - 100
19,0	68 - 92
12,5	60 - 80
9,5	50 - 70
4,75	37 - 53
2,00	26 - 41
0,850	17 - 32
0,425	11 - 25
0,180	5 - 17
0,075	2 - 8

Os agregados constituintes da mistura betuminosa são provenientes da britagem de rocha granítica obtidos na exploração da pedreira da empresa Jaime Ribeiro & Filhos, em Vilar do Paraíso, Vila Nova de Gaia. Foram utilizados quatro materiais com granulometrias distintas referenciados por: material 0-5, material 5-10, material 10-17 e material 17-27.

Trata-se de um agregado granítico, biotítico, de grão médio a grosseiro, de textura granular, por vezes com fenocristais de feldespato, apresentando uma percentagem significativa de cristais de feldespato róseo.

Para além destes agregados, foi utilizado na mistura um filer, constituído por uma cal hidráulica da Cimpor.

Por forma a averiguar da adequabilidade dos materiais empregues, foram realizados os seguintes ensaios laboratoriais:

- Análise granulométrica segundo as especificações LNEC E 233 [61] para os materiais 0-5, 5-10, 10-17 e 17-27 e E 234 [62], para o filer;
- Massas volúmicas e absorção de água, segundo a norma NP 581 [59], para os materiais 5-10, 10-17 e 17-27 e de acordo com a norma NP 954 [60], para o material 0-5;
- Massa volúmica para o filer, de acordo com a especificação LNEC E 64 [63];
- Desgaste de Los Angeles, de acordo com a especificação LNEC E 237 [52], para os materiais 5-10, 10-17 e 17-27;
- Equivalente de areia, segundo a especificação LNEC E 199 [55], para a mistura de agregados sem adição de filer;
- Índices de lamelação e alongamento, de acordo respectivamente com as normas inglesas BS 812-105.1 [53] e BS 812-105.2 [54], para os materiais 5-10, 10-17 e 17-27;
- Valor azul de metileno, segundo a especificação LNEC E 385 [58], para a mistura de agregados sem filer.

Os ensaios foram realizados no laboratório central da empresa do consórcio responsável pelos trabalhos de pavimentação e os resultados obtidos são apresentados nos quadros IV.2 e IV.3. Os valores obtidos para as características físicas e mecânicas ensaiadas apresentam valores que cumprem as exigências definidas quer no caderno de encargos da obra, quer na publicação da APORBET.

Para a obtenção de uma mistura de agregados que cumprisse o fuso granulométrico definido, utilizou-se um programa de cálculo automático que permitiu obter as dosagens de cada um dos componentes da mistura de agregados. No quadro IV.4 são apresentadas, para cada um dos componentes, as percentagens utilizadas na mistura de agregados.

Quadro IV.2 Granulometria dos agregados constituintes da mistura betuminosa

Abertura dos peneiros ASTM(mm)	Percentagem acumulada do material que passa (%)				
	Agregado 0-5	Agregado 5-10	Agregado 10-17	Agregado 17-27	Filer
64,0	100	100	100	100	--
50,8	100	100	100	100	--
37,5	100	100	100	100	--
25,0	100	100	100	95,3	--
19,0	100	100	100	42,9	--
12,5	100	100	55,3	1,0	100
9,5	100	98,8	14,2	0,2	100
4,75	100	21,5	0,3	0,1	100
2,00	81,2	12,0	0,3	0,1	100
0,850	56,9	2,4	0,2	0,1	100
0,425	38,6	1,5	0,2	0,1	100
0,180	20,5	1,4	0,2	0,1	100
0,075	9,9	1,1	0,1	0,1	70,9

Quadro IV.3 Características físicas e mecânicas dos agregados constituintes da mistura betuminosa

Característica		Referência do agregado				
		0-5	5-10	10-17	17-27	Filer
Massa volumica (g/cm ³)	Material impermeável	2,66	2,665	2,670	2,674	--
	Partículas secas	2,625	2,598	2,628	2,634	--
Densidade das partículas		--	--	--	--	2,73
Absorção de água (%)		0,5	1,0	0,6	0,6	--
Desgaste de Los Angeles (%)	Granulometria B	--	--	26	--	--
	Granulometria C	--	32	--	--	--
	Granulometria G	--	--	--	29	--
Índice de lamelação (%)		--	25	19	13	--
Índice de alongamento (%)		--	18	26	22	--
Característica		Mistura de agregados sem adição de filer				
Equivalente de areia (%)		61				
Valor azul de metileno		0,7				

Quadro IV.4 Percentagens de cada um dos agregados utilizadas na mistura de agregados

Referências dos agregados	17-27	10-17	5-10	0-5	Filer
Percentagens utilizadas na mistura de agregados (%)	30	15	17	35	3

Para estas dosagens obtêm-se uma mistura de agregados, cuja granulometria é apresentada no quadro IV.5, onde se encontram também representados os valores do fuso e da respectiva curva média. As curvas granulométricas do fuso granulométrico e da mistura de agregadas são apresentadas na figura 4.2.

Quadro IV.5 Granulometria da mistura de agregados

Abertura dos peneiros ASTM(mm)	Percentagem acumulada do material que passa (%)		
	Fuso granulométrico	Curva média	Curva adoptada
64,0	100	100	100
50,8	100	100	100
37,5	100	100	100
25,0	87 - 99	89,5	98,6
19,0	68 - 92	80,0	82,9
12,5	---	---	63,6
9,5	50 - 70	60,0	57,0
4,75	37 - 53	45,0	41,7
2,00	26 - 41	33,5	33,3
0,850	---	---	23,0
0,425	11 - 25	18,0	16,2
0,180	5 - 17	11,0	9,7
0,075	2 - 8	5	5,2

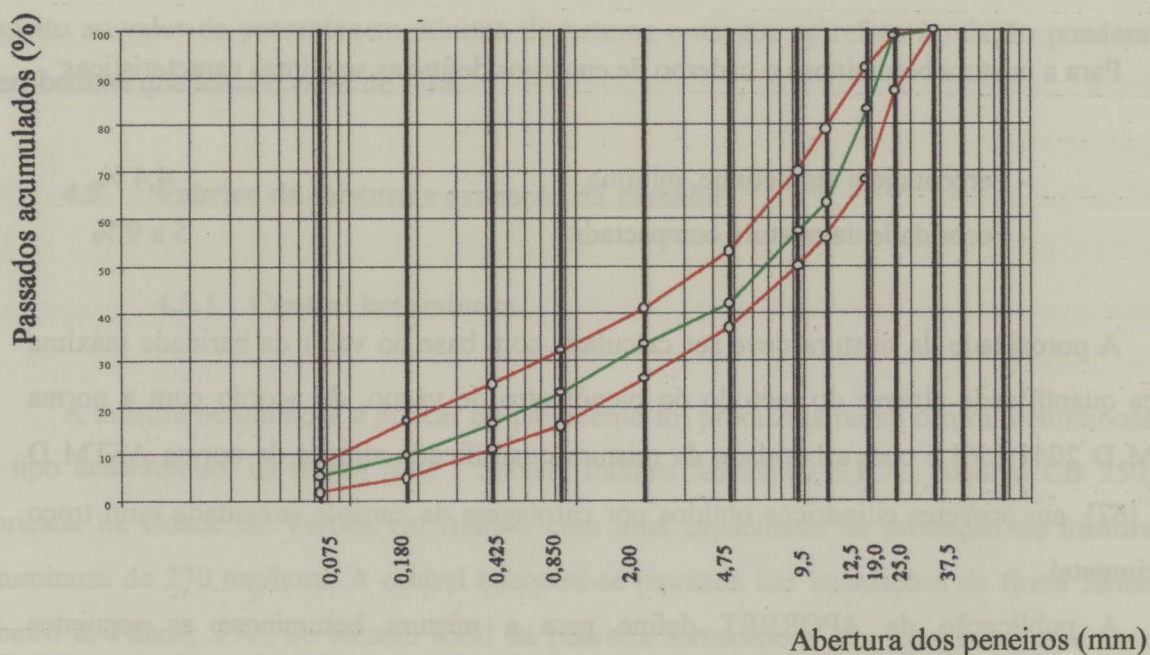


Fig. 4.2 Curvas granulométricas do fuso e da mistura de agregados

4.4.2 Características do betume

O ligante betuminoso utilizado na mistura é um betume do tipo 50/70 [10] da Shell. Para a caracterização do betume foram realizados os ensaios de penetração segundo a norma ASTM D5 [64] e de anel e bola de acordo com a norma ASTM D36 [65], tendo-se observado, como resultado dos ensaios os valores constantes no quadro IV.6.

Quadro IV.6 Características do betume utilizado no fabrico do macadame betuminoso

Identificação do ensaios	Valores observados
Penetração, 25 °C, 100 g, 5 s (0,1 mm)	54
Temperatura de amolecimento anel e bola (°C)	48

4.4.3 Características da mistura betuminosa

Para a mistura betuminosa o caderno de encargos define as seguintes características:

- | | |
|------------------------------------|---------|
| - Percentagem em betume, mínima | 4,4 % |
| - Porosidade da mistura compactada | 5 a 9 % |

A porosidade da mistura deve ser calculada com base no valor da baridade máxima teórica quantificada através do método do picnómetro de vácuo, de acordo com a norma ASTM D 2041 [66] e com a baridade da mistura quantificada através da norma ASTM D 2726 [67], em provetes cilíndricos obtidos por carotagem da camada executada num troço experimental.

A publicação da APORBET define para a mistura betuminosa as seguintes características:

- | | |
|--|-----------|
| - Percentagem de betume, mínima | 4,3% |
| - Relação ponderal filer/betume | 1,1 a 1,5 |
| - Porosidade em obra da mistura compactada | 4 a 8% |

A execução de um troço experimental permitiu definir como fórmula de trabalho a execução de uma mistura com uma percentagem em betume de 4,4% e para esta percentagem foi quantificado o valor da baridade máxima teórica, tendo sido obtido o valor de 2,51 g/cm³.

Assim, a mistura betuminosa em macadame betuminoso adoptada para a obra possui a seguinte composição gravimétrica:

Agregado 17-27	28,7%
Agregado 10-17	14,3%
Agregado 5-10	16,3%
Agregado 0- 5	34,3%
Filer	2,0%
Betume	4,4%

Obtém-se desta forma, uma mistura betuminosa de acordo com as exigências definidas quer no caderno de encargos da obra quer na publicação da APORBET, no que diz respeito ao valor da percentagem mínima de betume e no que se refere à relação ponderal filler/ betume que toma o valor de 1,18.

4.5 Fabrico da mistura e execução da camada

4.5.1 Central betuminosa

A mistura betuminosa a aplicar no pavimento foi produzida numa central betuminosa do tipo descontínuo, da marca SIM - Societa Italiana Macchine S.P.A., modelo CB 250, fabricada na cidade de Verona em Itália e com uma capacidade de produção de mistura betuminosa de 270 ton/hora. A central encontra-se montada nas instalações da firma Jaime Ribeiro & Filhos, S.A., no mesmo local da pedreira fornecedora dos agregados, com uma distância de transporte ao local da obra de cerca de 20 minutos. Trata-se de uma central totalmente automática com controlo de todo o processo de fabrico das misturas.

4.5.2 Pavimentadora

A colocação da mistura betuminosa na camada foi realizada com uma pavimentadora de rastos da marca Dynapac, modelo F14C, com uma capacidade teórica de aplicação de 500 t/h. A energia de compactação associada a este equipamento é constituída pelos sistemas de apiloamento e vibração.

4.5.3 Cilindros compactadores

A compactação da mistura betuminosa na camada é finalizada com a passagem de cilindros compactadores do tipo de pneus e do tipo rasto liso.

O cilindro de pneus utilizado foi da marca CATERPILLAR, modelo PF-300, com uma massa de operação total de 21 000 kg e uma massa máxima por pneu de 3 000 kg.

O cilindro de rasto liso é da marca DYNAPAC, modelo CC 232. Trata-se de um cilindro vibrador do tipo tandem, com uma massa de operação total de 8 700 kg e com um frequência de vibração entre 52 e 70 Hz.

4.5.4 Execução da camada

A camada de macadame foi executada sobre a camada de sub-base em material britado de granulometria extensa, após aplicação de uma rega de impregnação com uma emulsão catiónica de rotura lenta designada por EIC da CEPISA.

A temperatura da mistura no momento da colocação era de cerca de 140 °C.

A compactação da mistura foi assegurada através dos dois tipos de cilindros já referidos, realizando o cilindro de pneus primeiro cerca de 8 passagens, fazendo o cilindro de rasto liso o acabamento final da camada passando cerca de 5 vezes sobre a superfície da camada.

O controlo de obra engloba as seguintes tarefas e ensaios:

- extracção de carotes do pavimento para determinação da espessura da camada, percentagem de betume da mistura e granulometria da mistura de agregados;
- recolha de amostra da mistura betuminosa para a quantificação da baridade máxima teórica da mistura betuminosa.

A porosidade da mistura é calculada como a razão entre a baridade obtida nos provetes carotados e a baridade máxima teórica obtida no ensaio com picnómetro de vácuo.

4.6 Extracção das amostras por serragem de placas do pavimento

Os provetes para a execução dos ensaios de fadiga foram obtidos por serragem em laboratório de placas serradas do pavimento.

Para a serragem das placas foi utilizada uma máquina de corte, do tipo geralmente empregue no corte de pavimentos. Devido à elevada espessura da camada de macadame betuminoso, e por forma a que os cortes a realizar intersectassem toda a camada de modo a que as operações de remoção da placa não danificasse a mistura, foi necessário utilizar um disco de grandes dimensões.

Foram extraídas quatro placas para cada uma das quatro situações a estudar. Por forma a minimizar os danos causados ao pavimento pela extracção das placas, as zonas localizaram-se sempre nas bermas interiores, sendo esta operação realizada pouca antes da pavimentação nesses locais, de modo a que de imediato se procedesse ao preenchimento da

zona com mistura betuminosa, reduzindo ao máximo o tempo de exposição da camada granular aos efeitos das condições climáticas.

Cada grupo de quatro placas foi cortado em simultâneo com uma secção em planta com cerca de $0,5 \times 0,5 \text{ m}^2$.

O primeiro corte longitudinal foi realizado afastado de cerca de 1 m, relativamente à linha limite de pavimentação da camada de macadame betuminoso, procurando desta forma não intersectar uma zona de possível segregação da mistura, uma vez que corresponde a uma das extremidades da mesa da pavimentadora (fig 4.3).



Fig. 4.3 Locais de extracção das placas de macadame betuminoso

Após a realização de todos os cortes, as placas foram colocadas, através de um empilhador, sobre estrados de madeira, revestidos com uma tábua de madeira de modo a constituir uma superfície de apoio à placa de mistura betuminosa, continua e perfeitamente desempenada.

As placas foram então referenciadas através do quilómetro correspondente e evidenciada a direcção do eixo da estrada. Os locais de extracção encontram-se definidos no quadro IV.7.

Quadro IV.7 Identificação e localização das placas de macadame betuminoso extraídas do pavimento

Designação da mistura betuminosa	Localização	Identificação da placas
Macadame compactação corrente	Km 2+175 Gondomar- Porto	5 6 7 8
Macadame menor compactação	Km 2+175 Porto- Gondomar	1 2 3 4
Macadame percentagem superior de betume	Km 3+200 Gondomar- Porto	13 14 15 16
Macadame percentagem inferior de betume	Km 3+200 Porto- Gondomar	9 10 11 12

4.7 Preparação dos provetes

As placas foram transportadas para o laboratório onde foram serradas numa mesa de corte com serra de disco diamantado, por forma a obter os provetes prismáticos com as exigências dimensionais indicadas na norma de ensaio (fig. 4.4).

O diâmetro da serra deve ser suficientemente grande de modo a permitir realizar os cortes apenas num movimento vertical descendente, evitando desta forma irregularidades nas faces dos provetes originadas pelo disco da serra.

Os provetes foram serrados por forma a que o seu eixo longitudinal possua a mesma direcção do eixo da estrada. As referências dos provetes são as seguintes:

MCC - Macadame com Compactação Corrente;

MMC - Macadame com Menor Compactação;

MPI - Macadame com Percentagem Inferior de betume;

MPS - Macadame com Percentagem Superior de betume.

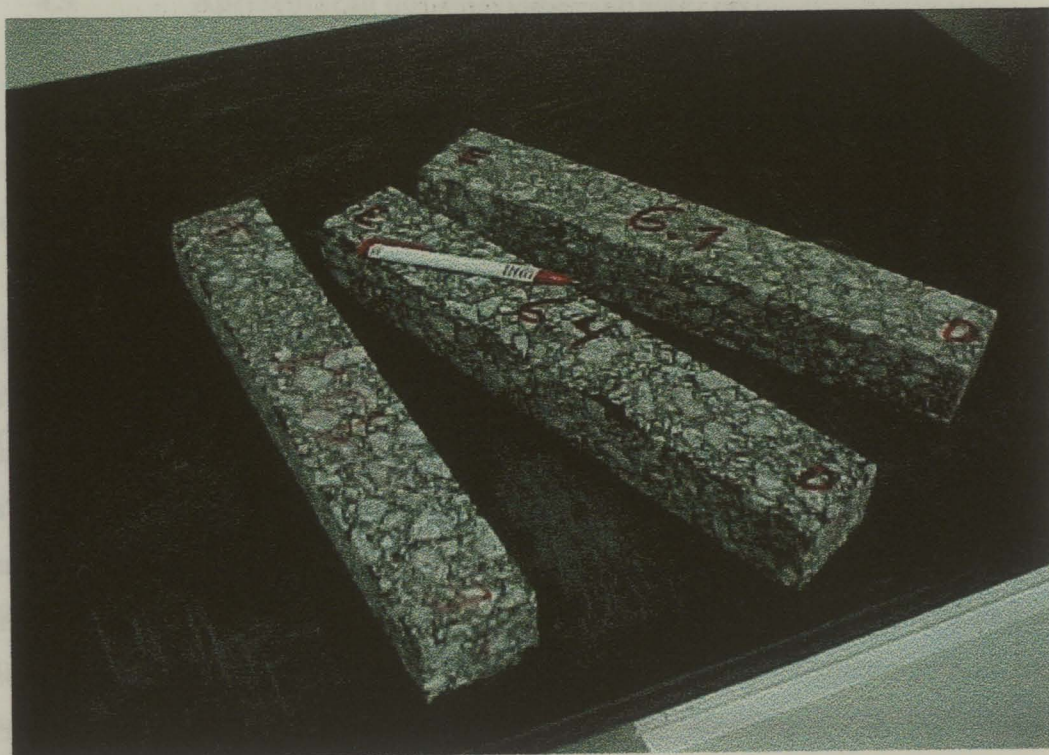


Fig. 4.4 Provetes prismáticos utilizados nos ensaios de fadiga

Para cada mistura betuminosa foram preparados 12 provetes e para todos eles foi determinada a massa volúmica aparente da mistura, de acordo com a norma ASTM D 2726 [67], bem como as suas dimensões, comprimento, largura e altura, sendo estas duas dimensões obtidas como a média de três leituras realizadas a meio do provete e em duas secções situadas, simetricamente do eixo, a uma distância deste de cerca de um sexto do seu comprimento.

4.8 Ensaios de fadiga

Os ensaios de fadiga foram realizados de acordo com a norma AASHTO TP8 [47], para três níveis de extensão distintos, para três provetes para cada nível de extensão, e para as seguintes condições de ensaio:

- Temperatura: 22 °C, conforme o valor considerado no projecto;
- Rigidez inicial: Valor da rigidez verificado ao fim de 50 ciclos de carga;

Ruína do provete: Ciclo de carga para o qual se verifica uma redução de 50% do valor da rigidez inicial;

Frequência de aplicação da carga: 10 Hz;

Tipo de carregamento: sinusoidal;

Coefficiente de Poisson: 0,35;

Níveis de extensão considerados nos ensaios: 600, 400 e 200 $\mu\epsilon$.

O programa SHRP propõem que os ensaios de fadiga sejam realizados para quatro níveis de extensão diferentes, de forma a que os provetes atinjam a rotura para aproximadamente 20 minutos, 1,3 e 12 horas, mas acrescentando que, se com este esquema os resultados obtidos apresentarem pouca coerência, tornando difícil a sua aproximação a uma recta, deverão ser considerados mais ensaios para outros valores de extensão [68]. Estas conclusões foram baseadas num programa de ensaios bastante alargado, realizados em equipamentos servohidráulicos. Como não existe experiência no que diz respeito a ensaios realizados com o tipo de equipamento utilizado neste trabalho, optou-se por realizar apenas três níveis de extensão, para valores de extensão mais baixos, realizando porém, para cada nível de extensão, ensaios em três provetes, procurando desta forma estudar a repetibilidade do equipamento.

No quadro IV.8 são apresentados os valores do coeficiente de Poisson a considerar para efeitos de cálculo para diversos tipos de materiais [69].

Refira-se que o coeficiente de Poisson de misturas betuminosas não varia muito de mistura para mistura. Por outro lado pequenas variações no seu valor não alteram os valores dos ensaios de maneira muito significativa.

Quadro IV.8 Valores do coeficiente de Poisson

Tipo de material	Coefficiente de Poisson
Betão betuminoso	
$E > 3\,450\text{ MPa}$	0,30
$E \leq 3\,450\text{ MPa}$	0,35
Betão hidráulico	0,15
Bases ou sub-bases estabilizadas com:	
cal	0,20
ligante hidráulico	0,20
ligante betuminoso	0,35
Base ou sub-base granulares	0,35
Sub-bases coesivas	0,45
Sub-bases não coesivas	0,35

4.9 Apresentação dos resultados obtidos

Antes de se executarem os ensaios de fadiga, realizaram-se ensaios de quantificação da massa volúmica aparente das misturas betuminosas ensaiadas, conforme já referido no ponto 4.7. Os valores obtidos nos ensaios são apresentados no quadro IV.9.

Os ensaios para a obtenção do comportamento à fadiga das misturas betuminosas foram realizados a 22°C de temperatura, por aplicação de um carregamento sinusoidal sem período de repouso, com controlo das extensões máximas de tracção e para uma frequência de 10 Hz. Foram realizados três ensaios para cada um dos três níveis de extensão estudados, 600, 400 e 200 $\mu\epsilon$.

Após os ensaios de fadiga, a mistura betuminosa constituinte de alguns provetes foi desagregada, por forma a realizar ensaios de determinação da percentagem em betume das misturas. Os ensaios foram realizados de acordo com a especificação LNEC E 268 [70], apresentando-se os resultados obtidos no quadro IV.10.

Os valores obtidos nos ensaios de fadiga, referentes à rigidez, ângulo de fase, energia dissipada acumulada e número de ciclos de carga até à ruína dos provetes, são apresentados de forma resumida nos quadros IV.11 a IV.13.

Os ensaios de resistência à fadiga permitiram não só o estudo desta característica, mas também a obtenção da variação da rigidez, do ângulo de fase e da energia dissipada, em função do número de ciclos de carga aplicados aos provetes.

Nas figuras 4.5 a 4.7 são apresentadas as curvas de variação da rigidez das misturas betuminosas, com o número de aplicações de carga para os três níveis de extensão de tracção estudados. A relação entre a rigidez e o número de aplicações de carga até se atingir a ruína do provete é do tipo exponencial, podendo ser definida por uma expressão do tipo:

$$E_m^* = A \cdot e^{B.N_f} \quad (4.2)$$

em que A e B são constantes.

No quadro IV.14 são apresentados os valores das constantes A e B para os três níveis de extensão, bem como os respectivos coeficientes de correlação. É de salientar a boa correlação verificada para os dois níveis de extensão mais elevados, verificando-se um decréscimo muito acentuado dessa correlação para o nível de extensão mais baixo.

Quadro IV.9 Valores da massa volúmica aparente obtidos nos ensaios

Referência da mistura betuminosa	Número da placa	Referência do provete					
		Massa volúmica aparente (g/cm ³)					
MCC	5	5.1	—	—	—	—	—
		2,41	—	—	—	—	—
	6	6.1	6.2	6.3	6.4	6.5	—
		2,41	2,41	2,38	2,40	2,41	—
	8	8.1	8.2	8.3	8.4	8.5	8.6
		2,41	2,40	2,41	2,40	2,41	2,40
MMC	1	1.1	1.2	1.3	1.4	—	—
		2,36	2,35	2,33	2,33	—	—
	2	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	—
		2,37	2,37	2,32	2,34	2,37	—
	3	3.1	3.2	3.3	—	—	—
		2,37	2,36	2,35	—	—	—
MPS	10	10.1	10.2	10.3	10.4	10.5	—
		2,39	2,37	2,36	2,38	2,38	—
	11	11.1	11.2	11.3	—	—	—
		2,38	2,37	2,39	—	—	—
	12	12.1	12.2	12.3	12.4	12.5	—
		2,39	2,37	2,38	2,38	2,40	—
MPI	14	14.1	14.2	14.3	14.4	—	—
		2,38	2,39	2,39	2,36	—	—
	15	15.1	15.2	15.3	—	—	—
		2,40	2,38	2,39	—	—	—
	16	16.1	16.2	16.3	16.4	16.5	16.6
		2,38	2,36	2,35	2,38	2,36	2,38

Nota: Das placas 4,7,9 e 13 não foram preparados quaisquer provetes.

Quadro IV.10 Valores das percentagens em betume obtidos nos ensaios

Referência da mistura	Referência do provete	Valor da percentagem em betume
MCC	6.3	4,9
	8.5	5,0
MMC	2.4	5,1
	3.1	5,0
MPS	11.3	5,6
	12.2	5,7
MPI	15.2	4,2
	14.1	4,1

A análise dos gráficos das figuras 4.5 a 4.7 permite concluir que, para qualquer um dos valores da extensão ensaiados, a mistura betuminosa com percentagem superior de betume apresenta maior rigidez que qualquer uma das restantes, enquanto que a mistura com percentagem inferior de betume apresenta uma rigidez superior à mistura definida para aplicação em obra. O aumento da rigidez da mistura com o aumento da percentagem em betume, aspecto que ocorreu para a mistura com maior percentagem em betume, pode ser devido a aspectos relacionados com uma melhor distribuição do agregado na mistura durante a compactação ou para o facto de a mistura betuminosa, referenciada por compactação corrente, não apresentar a melhor formulação em termos de percentagem em betume.

Qualquer uma destas três misturas betuminosas apresenta, por sua vez, maior rigidez que a mistura com maior porosidade.

Na figura 4.8 apresenta-se a variação da rigidez, verificada no último ciclo de carga dos ensaios de fadiga, para as quatro misturas betuminosas ensaiadas, função da amplitude de extensão de tracção aplicada aos provetes. As variações seguem uma lei do tipo:

$$E_m^* = a + \varepsilon_{tm} \cdot b \quad (4.3)$$

Quadro IV.11 Resumo dos valores obtidos nos ensaios de fadiga
para uma extensão de 600 $\mu\epsilon$

Designação da mistura betuminosa	Referencia do provete	Rigidez (MPa)	Ângulo de fase (°)	Energia dissipada acumulada (kPa)	Número de ciclos até à ruína
MCCE1P1	5.1	3 969	47,3	1,297	2 390
MCCE1P2	6.3	3 897	47,5	3,597	6 920
MCCE1P3	6.5	5 624	51,5	5,609	8 020
Valores médios		4 497	48,8	3,5	5 777
MMCE1P1	2.1	3 614	47,9	4,891	10 200
MMCE1P2	2.3	2 156	51,9	2,314	7 350
MMCE1P3	3.2	2 657	44,1	1,552	4 200
Valores médios		2 809	48,0	2,9	7 250
MPSE1P1	12.1	6 918	45,9	4,944	6 340
MPSE1P2	12.2	6 131	46,9	8,130	11 880
MPSE1P3	12.3	5 558	47,4	8,045	12 350
Valores médios		6 202	46,7	7,0	10 190
MPIE1P1	16.3	4 371	47,0	6,137	11 560
MPIE1P2	16.4	5 737	47,4	5,507	8 040
MPIE1P3	16.2	4 961	46,7	5,167	8 290
Valores médios		5 023	47,0	5,6	9 297

Os parâmetros a e b, definidores das leis de variação, são apresentados no quadro IV.15.

As leis de fadiga das misturas betuminosas estudadas neste trabalho são apresentadas individualmente nas figuras 4.9 a 4.12, apresentando-se na figura 4.13 um gráfico com o traçado das curvas de fadiga para as quatro misturas betuminosas em conjunto.

Da análise das figuras podemos constatar que as curvas de fadiga das misturas correspondentes às situações de menor compactação (MMC), percentagem inferior de betume (MPI), e percentagem superior de betume (MPS), possuem traçados praticamente paralelos, apresentando a mistura com percentagem superior de betume (MPS) melhor

Quadro IV.12 Resumo dos valores obtidos nos ensaios de fadiga
para uma extensão de 400 $\mu\epsilon$

Designação da mistura betuminosa	Referencia do provete	Rigidez (MPa)	Ângulo de fase (°)	Energia dissipada acumulada (kPa)	Número de ciclos até à ruína
MCCE2P1	8.4	4 175	46,3	6,680	26 010
MCCE2P2	8.3	4 366	47,5	16,907	61 360
MCCE2P3	6.2	6 840	45,3	6,879	19 040
Valores médios		5 127	46,4	10,2	35 470
MMCE2P1	1.4	3 278	43,3	3,607	18 420
MMCE2P2	3.3	2 591	43,7	1,615	9 190
MMCE2P3	2.2	4 031	42,3	4,214	18 270
Valores médios		3 300	43,1	3,1	15 290
MPSE2P1	12.5	5 572	44,3	15,675	55 110
MPSE2P2	12.4	5 405	43,2	14,725	70 490
MPSE2P3	10.3	5 832	45,0	18,184	59 440
Valores médios		5 603	44,2	16,2	61 680
MPIE2P1	15.1	5 264	39,7	9,169	34 720
MPIE2P2	16.5	7 611	42,6	5,928	16 160
MPIE2P3	14.3	5 186	41,0	10,231	36 000
Valores médios		6 020	41,1	8,4	28 960

comportamento que a mistura com percentagem inferior de betume (MPI) e esta por sua vez, melhor comportamento que a mistura com menor compactação (MMC).

A mistura betuminosa definida para aplicação em obra (MCC), apresenta uma curva de fadiga concorrente com as curvas das restantes misturas betuminosas, demonstrando um pior comportamento para elevados níveis de extensão de tracção. No entanto, para valores da extensão de tracção inferiores a cerca de 300 $\mu\epsilon$, a mistura (MCC) apresenta melhor comportamento à fadiga relativamente à mistura com percentagem inferior de betume (MPI), verificando-se para valores de extensão de tracção inferiores a cerca de 200 $\mu\epsilon$, passa a apresentar melhor comportamento à fadiga do que a mistura com percentagem superior de betume (MPS).

Quadro IV.13 Resumo dos valores obtidos nos ensaios de fadiga
para uma extensão de 200 $\mu\epsilon$

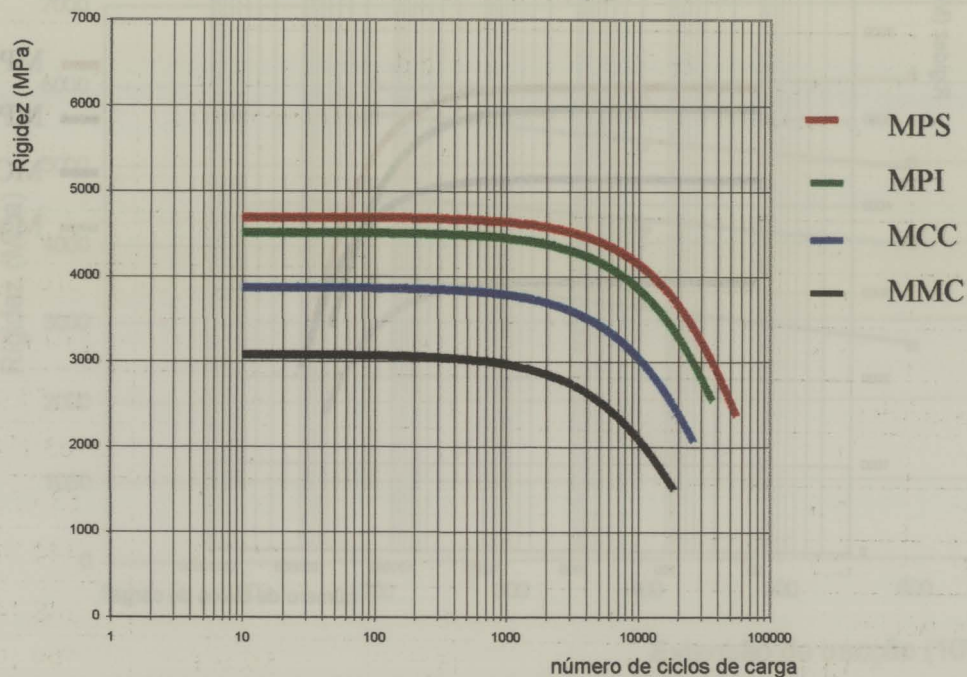
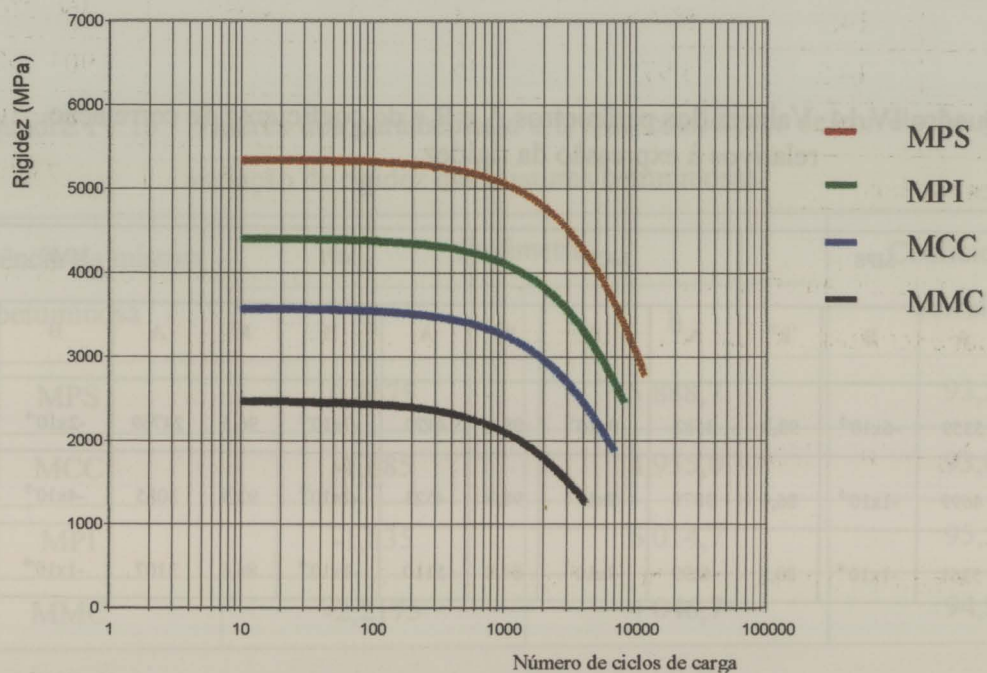
Designação da mistura betuminosa	Referencia do provete	Rigidez (MPa)	Ângulo de fase (°)	Energia dissipada acumulada (kPa)	Número de ciclos até à ruína
MCCE3P1	8.1	5 607	38,6	55,812	714 550
MCCE3P2	8.6	4 244	37,8	46,388	719 260
MCCE3P3	8.5	4 671	37,8	69,664	1 013 850
Valores médios		4 840	38,1	57,3	815 890
MMCE3P1	1.2	3 296	35,8	3,467	63 170
MMCE3P2	2.4	3 544	36,2	26,492	536 510
MMCE3P3	2.5	4 136	36,4	25,798	444 740
Valores médios		3 659	36,1	18,6	348 140
MPSE3P1	10.4	6 024	35,5	55,161	709 190
MPSE3P2	10.5	6 308	37,3	73,039	846 980
MPSE3P3	10.2	6 140	38,5	64,073	775 320
Valores médios		6 157	37,1	64,1	777 160
MPIE3P1	14.1	5 695	34,4	33,950	466 130
MPIE3P2	14.2	5 975	35,7	67,361	903 290
MPIE3P3	14.4	5 527	32,1	38,670	781 610
Valores médios		5 732	34,1	46,7	717 010

Como já referido anteriormente, a variação do comportamento à fadiga das misturas betuminosas pode ser ajustado com boa aproximação a equações do tipo:

$$N_f = a \cdot (1/\epsilon_{tm})^b \quad (4.4)$$

sendo a e b constantes obtidas experimentalmente.

No quadro IV.16 apresentam-se os valores dos parâmetros a e b, bem como os coeficientes de correlação respectivos. Desde já deve ser salientado os elevados valores dos coeficientes de correlação, tendo em conta a forma como os provetes foram obtidos e o tipo de equipamento utilizado.

Fig. 4.5 Variação da rigidez para um valor de extensão de $600 \mu\epsilon$ Fig. 4.6 Variação da rigidez para um valor de extensão de $400 \mu\epsilon$

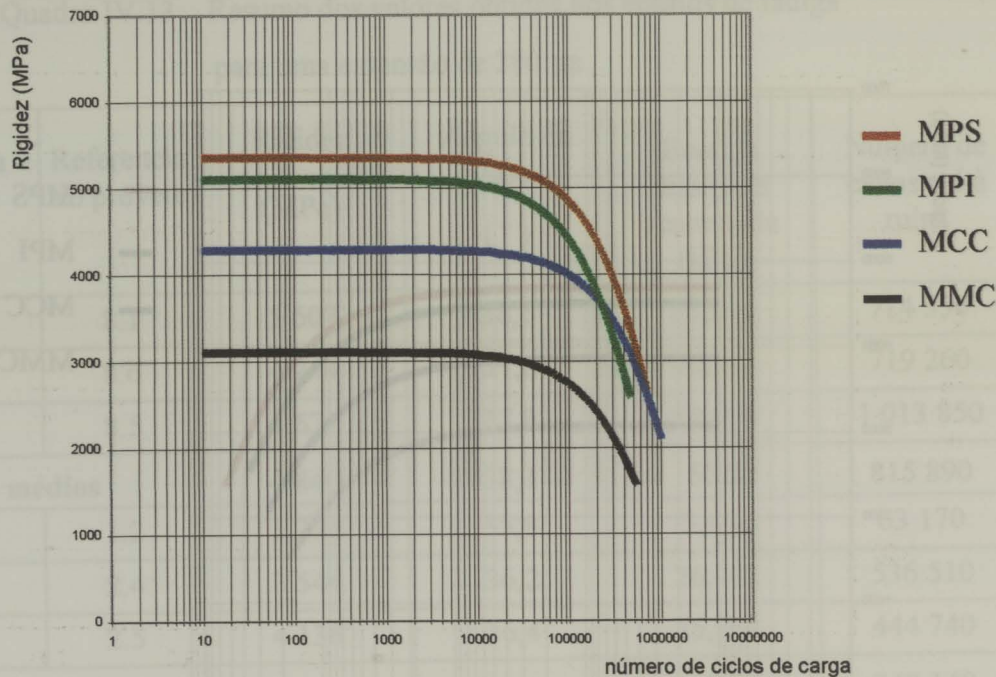


Fig. 4.7 Variação da rigidez para um valor de extensão de 200 $\mu\epsilon$

Quadro IV.14 Valores dos parâmetros A e B e do coeficiente de correlação relativos à expressão da rigidez

Valor da extensão ($\mu\epsilon$)	MPS			MCC			MPI			MMC		
	A	B	R ²	A	B	R ²	A	B	R ²	A	B	R ²
600	5359	-6x10 ⁻⁵	93,3	3583	-9x10 ⁻⁵	98,1	4420	-7x10 ⁻⁵	96,5	24769	-2x10 ⁻⁴	96,8
400	4699	-1x10 ⁻⁵	86,1	3878	-2x10 ⁻⁵	98,3	4523	-2x10 ⁻⁵	92,3	3085	-4x10 ⁻⁵	97,5
200	5361	-1x10 ⁻⁶	80,5	4299	-7x10 ⁻⁷	84,8	5110	-1x10 ⁻⁶	86,6	3107	-1x10 ⁻⁶	84,4

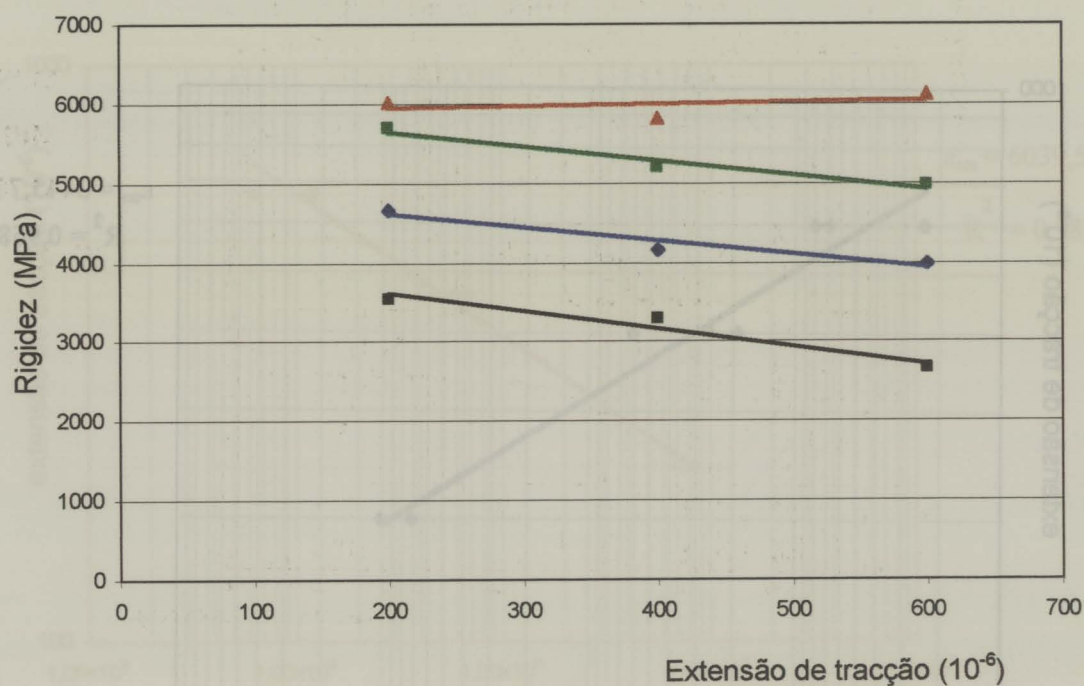


Fig. 4.8 Variação do valor da rigidez das misturas betuminosas com o valor da extensão de tracção

Quadro IV.15 Valores dos parâmetros a e b e do coeficiente de correlação relativos à variação da rigidez das misturas betuminosas

Referência da mistura betuminosa	Parâmetro		Coeficiente de correlação
	a	b	
MPS	0,2675	5 888,7	93,53
MCC	-1,685	4 955,0	93,09
MPI	-1,835	6 014,7	95,25
MMC	-2,2175	4 046,7	94,93

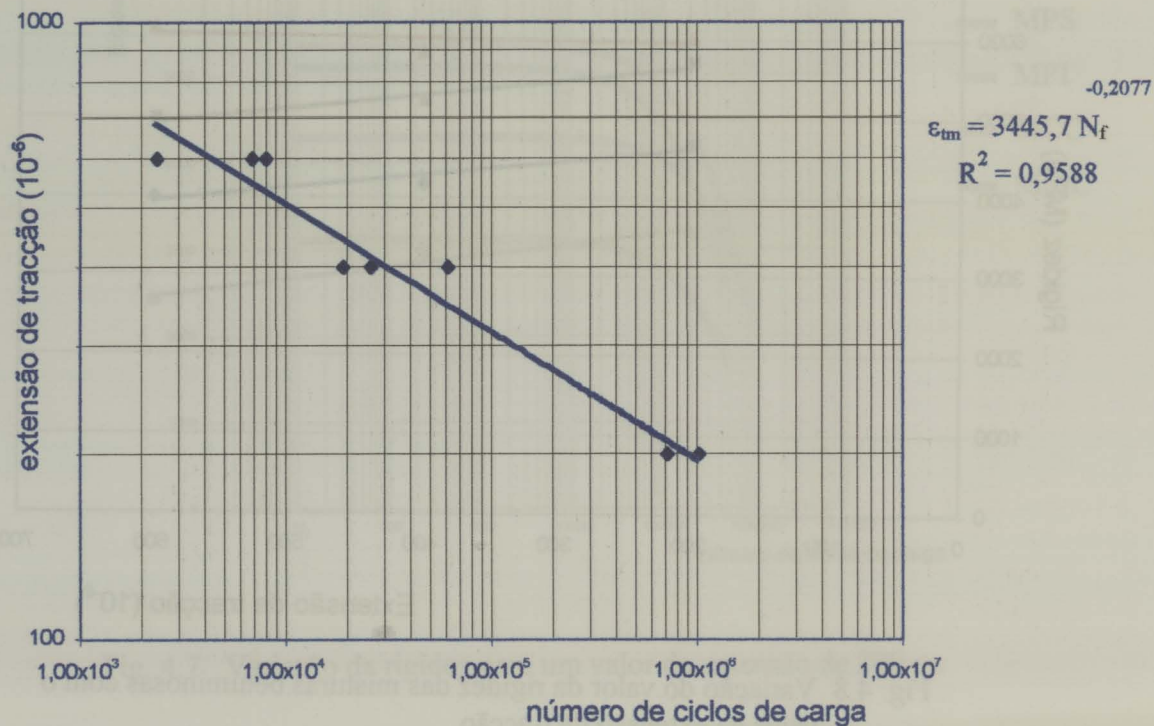


Fig. 4.9 Lei de fadiga para o macadame compactação corrente

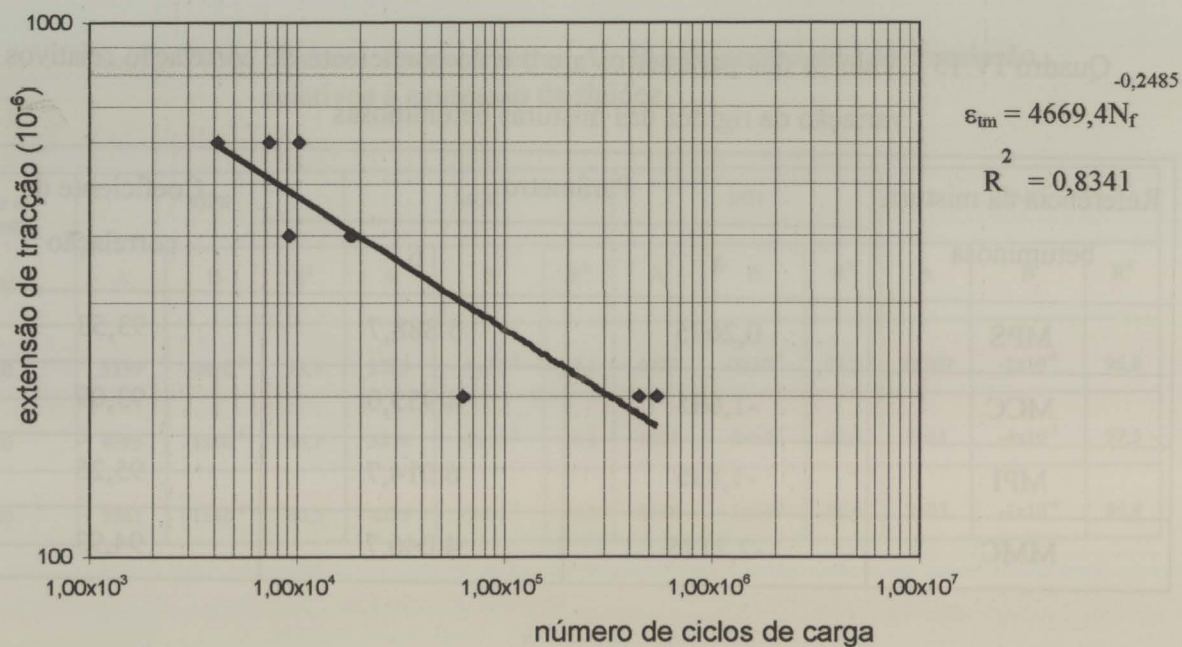


Fig. 4.10 Lei de fadiga para o macadame menor compactação

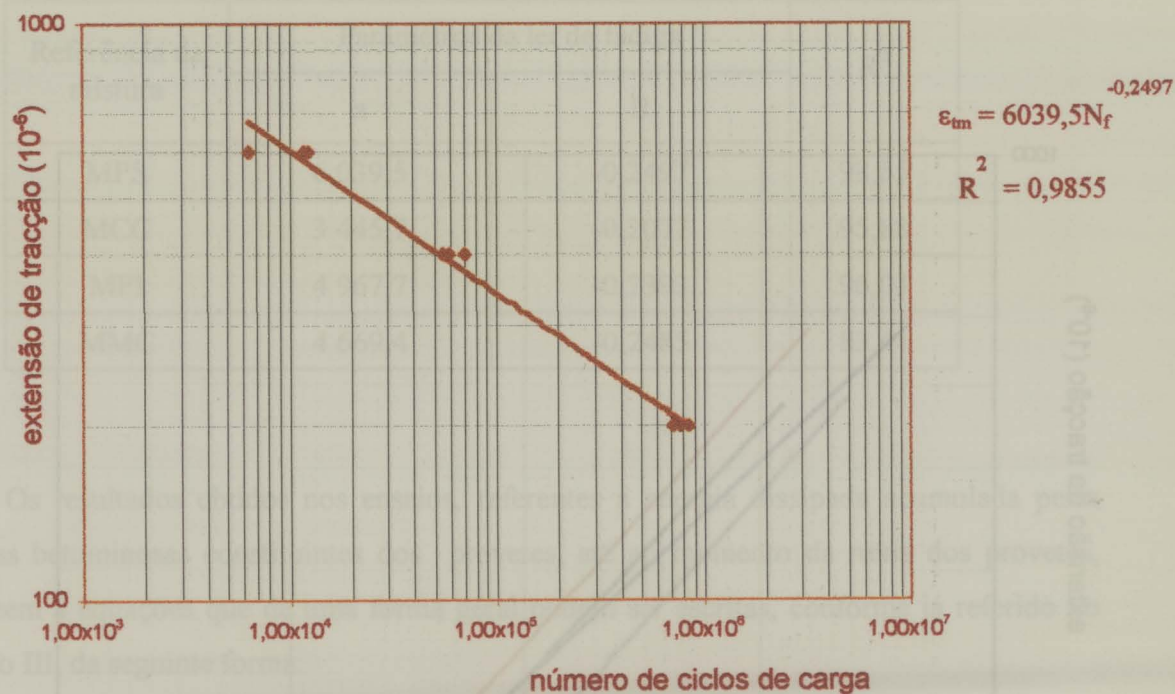


Fig. 4.11 Lei de fadiga para o macadame com percentagem superior de betume

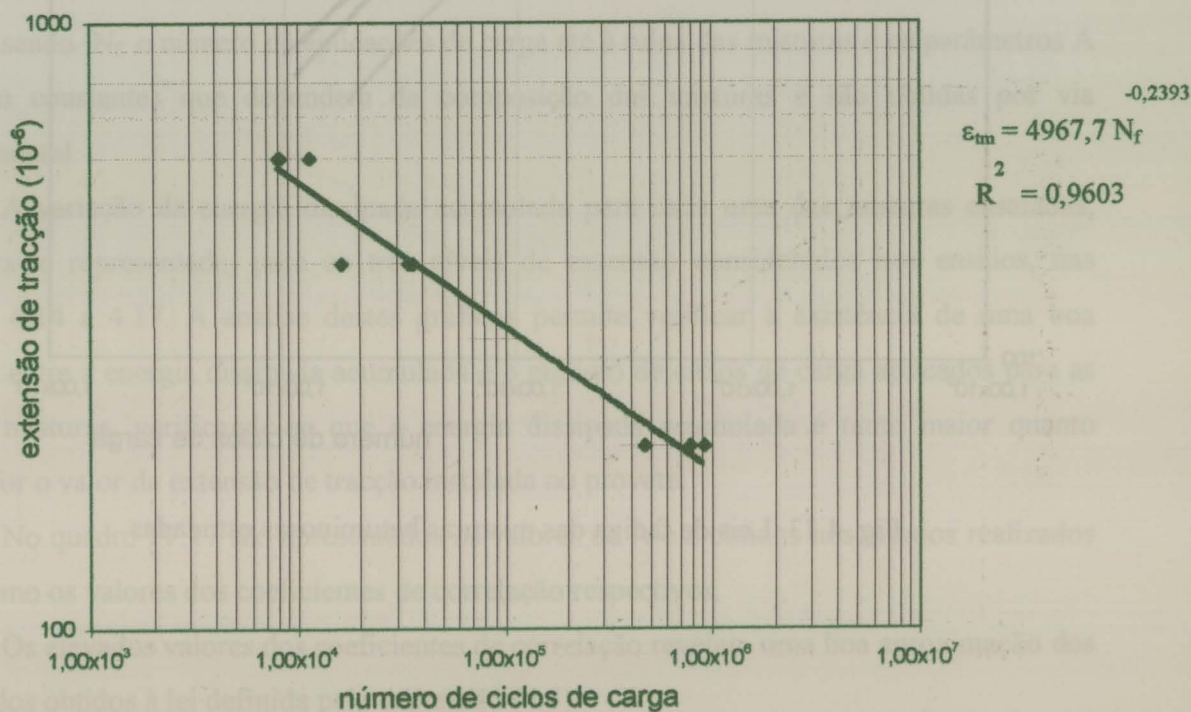


Fig. 4.12 Lei de fadiga para o macadame com percentagem inferior de betume

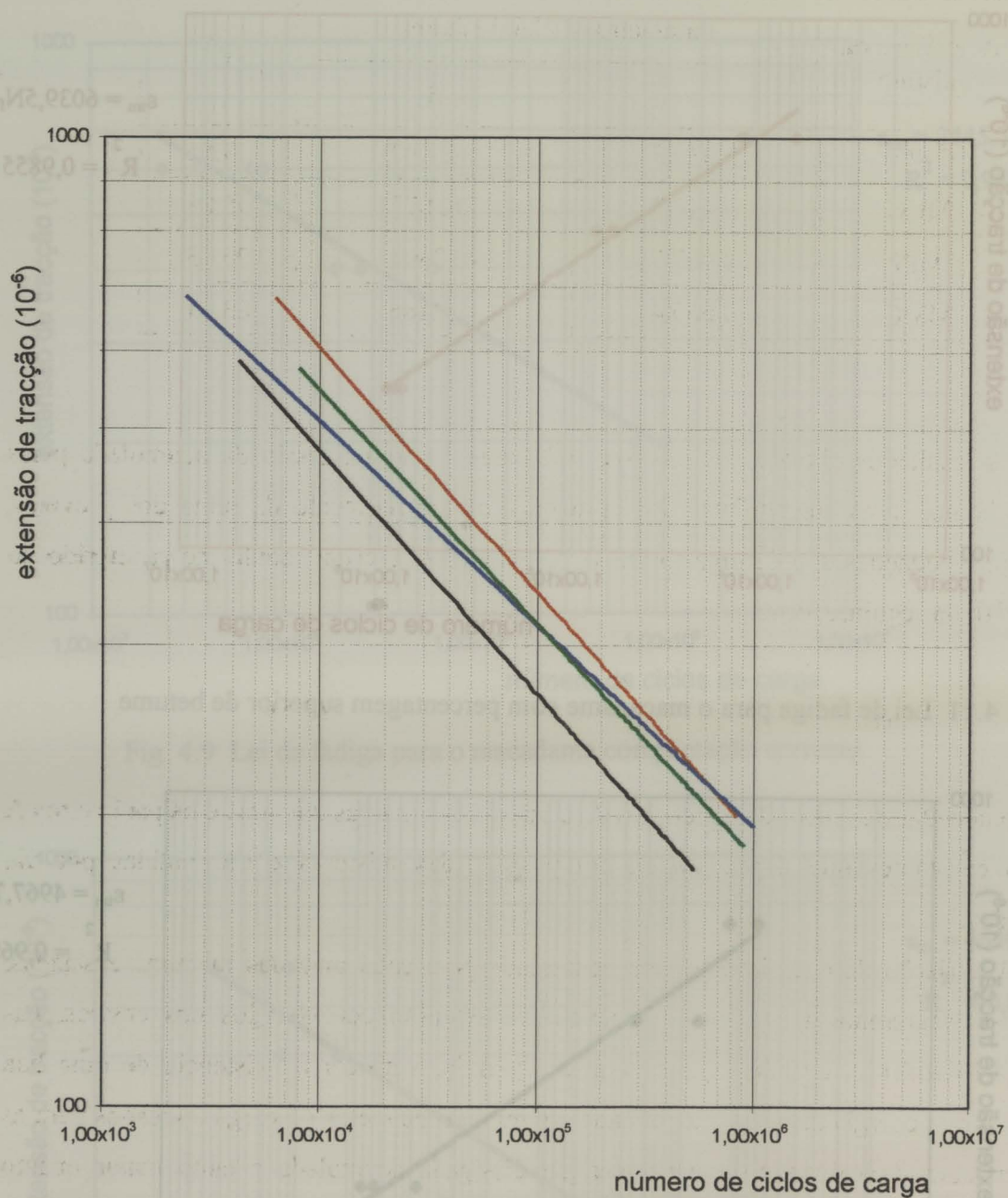


Fig. 4.13 Leis de fadiga das misturas betuminosas estudadas

Quadro IV.16 Valores dos parâmetros a e b e do coeficiente de correlação relativos às leis de fadiga

Referência da mistura	Parâmetros da lei de fadiga		R ²
	a	B	
MPS	6 039,5	-0,2497	98,55
MCC	3 445,7	-0,2077	95,88
MPI	4 967,7	-0,2393	96,03
MMC	4 669,4	-0,2485	83,41

Os resultados obtidos nos ensaios, referentes à energia dissipada acumulada pelas misturas betuminosas constituintes dos provetes, até ao momento da ruína dos provetes, conduzem a equações que de uma forma geral podem ser escritas, conforme já referido no capítulo III, da seguinte forma:

$$W_{\text{dafi}} = A \cdot (N_f)^z \quad (4.5)$$

sendo N_f o número de aplicações de carga até à ruína das misturas e os parâmetros A e z são constantes que dependem da composição das misturas e são obtidas por via experimental.

A variação da energia dissipada acumulada para cada uma das misturas ensaiadas, encontra-se representada, para os três níveis de extensão considerados nos ensaios, nas figuras 4.14 a 4.17. A análise destes gráficos permite verificar a existência de uma boa relação entre a energia dissipada acumulada e o número de ciclos de carga aplicados para as quatro misturas, verificando-se que a energia dissipada acumulada é tanto maior quanto maior for o valor da extensão de tracção instalada no provete.

No quadro IV.17 são apresentados os valores de A e z obtidos nos ensaios realizados bem como os valores dos coeficientes de correlação respectivos.

Os elevados valores dos coeficientes de correlação revelam uma boa aproximação dos resultados obtidos à lei definida pela expressão (4.5).

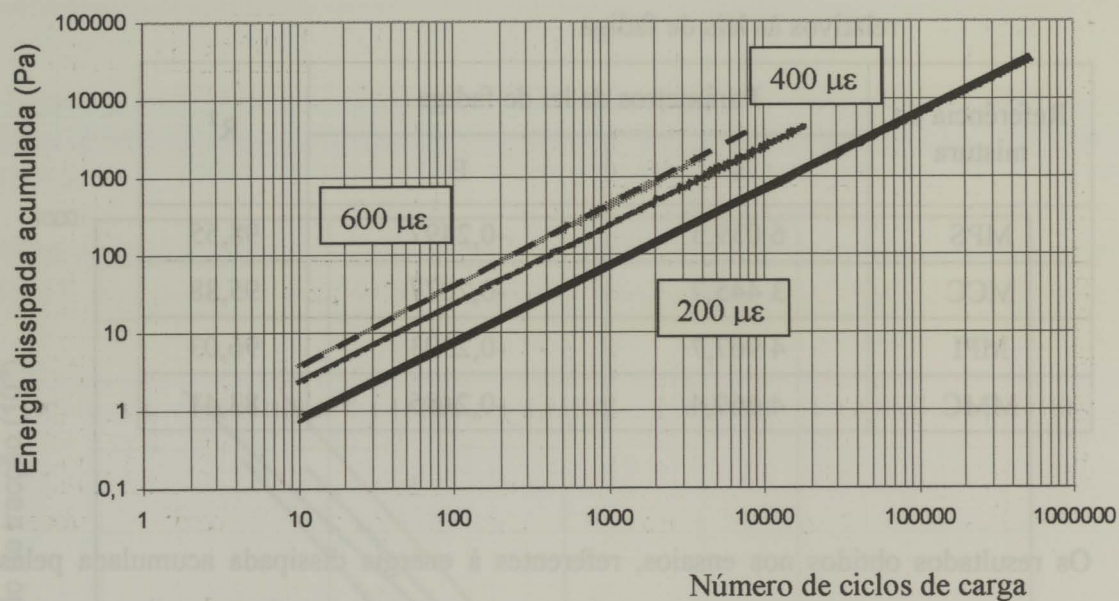


Fig. 4.14 Variação da energia dissipada acumulada para o macadame menor compactação, para os três níveis de extensão

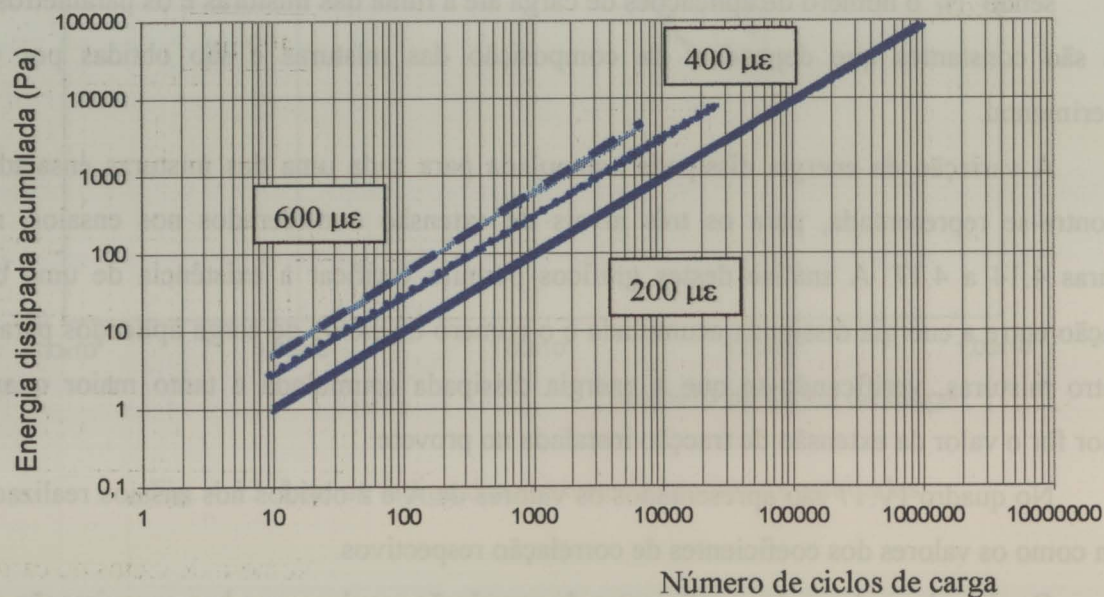


Fig. 4.15 Variação da energia dissipada acumulada para o macadame compactação corrente, para os três níveis de extensão

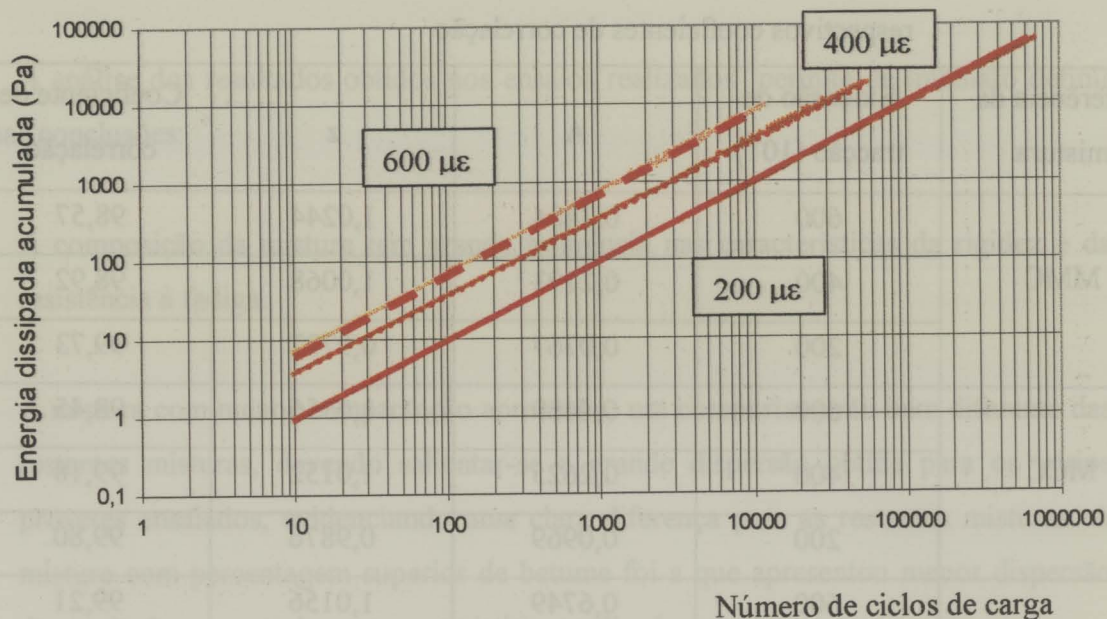


Fig. 4.16 Variação da energia dissipada acumulada para o macadame com percentagem superior de betume, para os três níveis de extensão

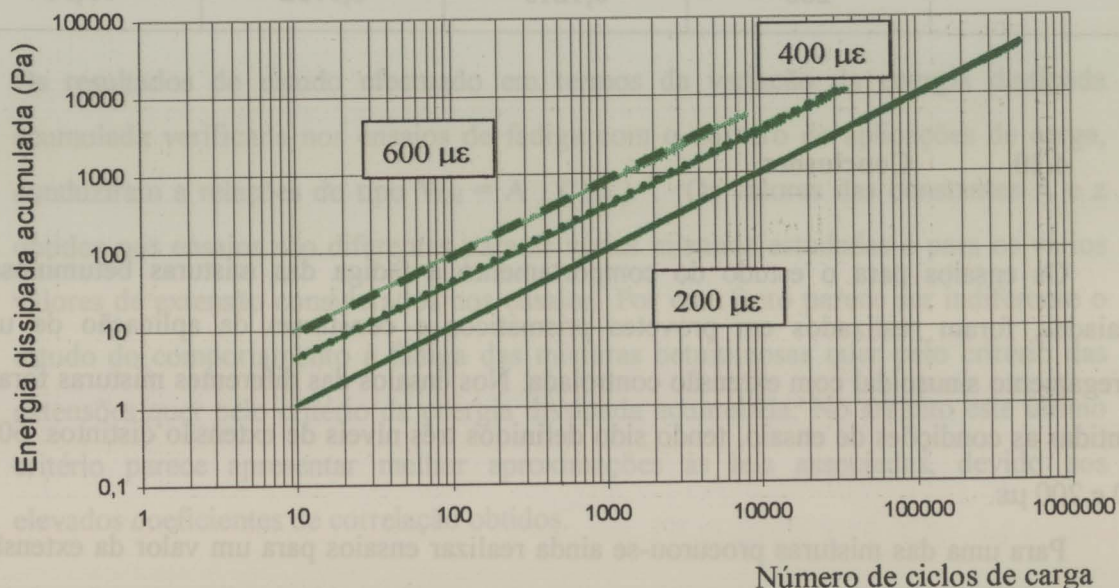


Fig. 4.17 Variação da energia dissipada acumulada para o macadame com percentagem inferior de betume, para os três níveis de extensão

Quadro IV.17 Valores dos coeficientes A e z da expressão da energia dissipada acumulada e respectivos coeficientes de correlação

Referência da mistura	Extensão de tracção (10^{-6})	A	z	Coeficiente de correlação
MMC	600	0,3484	1,0244	98,57
	400	0,2193	1,0068	98,92
	200	0,0767	0,9787	99,73
MCC	600	0,4489	1,0356	98,45
	400	0,2625	1,0152	99,18
	200	0,0969	0,9876	99,80
MPS	600	0,6749	1,0156	99,21
	400	0,3818	0,9870	99,36
	200	0,1008	0,9924	99,72
MPI	600	1,1744	0,9380	99,87
	400	0,4655	0,9648	99,97
	200	0,1213	0,9752	99,96

4.10 Conclusões

Os ensaios para o estudo do comportamento à fadiga das misturas betuminosas ensaiadas, foram realizados em provetes prismáticos e constaram da aplicação de um carregamento sinusoidal com extensão controlada. Nos ensaios das diferentes misturas foram mantidas as condições de ensaio, tendo sido definidos três níveis de extensão distintos: 600, 400 e 200 $\mu\epsilon$.

Para uma das misturas procurou-se ainda realizar ensaios para um valor da extensão de 120 $\mu\epsilon$, valor idêntico à extensão de tracção em serviço para a camada em estudo, obtido no dimensionamento do pavimento. O ensaio porém revelou-se muito longo, tendo sido interrompido, devido a um corte de energia eléctrica, ao fim de 130 horas de ensaio,

verificando-se nesse momento uma diminuição da rigidez da mistura betuminosa de apenas 28%.

A análise dos resultados obtidos nos ensaios realizados permite de imediato definir algumas conclusões:

- A composição da mistura tem grande influência nas características da rigidez e da resistência à fadiga.
- A mistura com menor compactação apresentou um comportamento bem diferente das restantes misturas, devendo salientar-se a grande dispersão obtida para os vários provetes ensaiados, evidenciando uma clara diferença para as restantes misturas. A mistura com percentagem superior de betume foi a que apresentou menor dispersão de resultados, para todas as características analisadas.
- Em termos de vida à fadiga regista-se um melhor comportamento da mistura preconizada para utilização em obra, referenciada por macadame compactação corrente, para valores da extensão de tracção mais baixos, ou seja para valores mais próximos daqueles que se verificam no pavimento.
- Os resultados do estudo efectuado em termos da variação da energia dissipada acumulada verificada nos ensaios de fadiga com o número de aplicações de carga, conduziram a relações do tipo $W_N = A \cdot (N_f)^z$. Os valores das constantes A e z obtidos nos ensaios são diferentes para as várias misturas estudadas e para os vários valores de extensão considerados nos ensaios. Por este facto parece ser indiferente o estudo do comportamento à fadiga das misturas betuminosas quer pelo critério das extensões quer pelo critério da energia dissipada acumulada. No entanto este último critério parece apresentar melhor aproximações às leis associadas, devido aos elevados coeficientes de correlação obtidos.
- Os resultados obtidos nos ensaios laboratoriais permitem igualmente concluir da necessidade de um estudo mais racional deste tipo de mistura betuminosa, procurando nomeadamente definir melhor em obra a percentagem óptima de betume a utilizar, para se

obter o melhor desempenho da mistura betuminosa, nomeadamente no que diz respeito ao seu comportamento à fadiga.

CAPÍTULO V

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES

Com o trabalho desenvolvido, pretendeu-se contribuir para um melhor entendimento sobre a resistência à fadiga das misturas betuminosas, fazendo a apresentação das metodologias existentes para a quantificação laboratorial desta característica.

5.1 Equipamento

O equipamento servopneumático utilizado nos ensaios de fadiga realizados no âmbito deste trabalho, demonstrou possuir qualidades muito importantes, das quais podemos destacar:

- Boa qualidade dos materiais constituintes de todo o equipamento e acessórios;
- Facilidade de manuseamento e técnica de ensaio muito simples, facilitando a preparação adequada dos utilizadores;
- Adequada resolução dos equipamentos de medida;
- Os equipamentos de medida possuem alcance que permite realizar ensaios para a totalidade das misturas betuminosas correntemente utilizadas nas camadas de base dos pavimento nacionais;
- Programa de aquisição e tratamento de resultados eficiente e de fácil utilização.

A campanha de ensaios realizada permitiu ainda concluir do elevado consumo de ar comprimido durante os ensaios, pelo que se recomenda a utilização de um compressor de elevada capacidade de armazenamento de ar comprimido. Sugere-se ainda a adopção de um diferencial de pressão como elemento actuador da unidade de aquisição e controlo, para que, no caso de uma interrupção de energia eléctrica, não ocorram danos quer ao equipamento quer ao provete de ensaio.

5.2 Ensaaios realizados

A rigidez de uma determinada mistura betuminosa depende grandemente, entre outros factores, da temperatura, do tempo de carregamento e da amplitude da extensão de tracção aplicada ao provete durante o carregamento, podendo variar entre cerca de 500 MPa para elevadas temperaturas e baixa velocidade, até cerca de 20 GPa para baixas temperaturas e elevada velocidade, ou seja pequenos tempos de carregamento [71].

Por outro lado a rigidez das misturas betuminosas depende igualmente das características dos componentes da mistura betuminosa, bem como da sua distribuição volumétrica na mistura. Este mesmo facto ficou provado na parte experimental deste trabalho, verificando-se uma quebra na rigidez da mistura betuminosa, quantificada nos ensaios de fadiga, entre aproximadamente 24 e 37 % para um aumento da porosidade de 4 para 6 %.

A rigidez de uma mistura betuminosa pode ser prevista através de fórmulas empíricas obtidas por via experimental, ou através de ensaios realizados em laboratório, pela aplicação de um carregamento a provetes da mistura betuminosa. No caso em estudo pode concluir-se que a rigidez da mistura betuminosa é sensível a pequenas variações da percentagem em betume, verificando-se no entanto ser a porosidade da mistura betuminosa, o aspecto que conduz à quebra mais acentuada do valor da rigidez.

O valor da rigidez da mistura betuminosa, obtido pela aplicação da expressão da SHELL e considerado no dimensionamento do pavimento é de 4 800 MPa. Os valores da rigidez obtidos nos ensaios das misturas para as quais se fez variar a percentagem em betume, são superiores ao valor definido no dimensionamento. No entanto a mistura betuminosa correspondente a uma menor compactação, apresenta um valor da rigidez muito inferior ao definido no dimensionamento do pavimento.

Conclui-se pois ser extremamente importante as operações de compactação das misturas betuminosas, devendo ser dado especial atenção ao controlo de obra durante a realização dos trabalhos de compactação. Este aspecto é realçado se tomarmos em conta que a mistura com menor compactação (MMC) foi obtida em obra fazendo variar apenas a ordem de actuação dos cilindros compactadores, relativamente à mistura com compactação corrente (MCC).

Na previsão da vida à fadiga das misturas betuminosas, as fórmulas geralmente usadas no dimensionamento dos pavimentos, são as previstas pelas metodologias propostas pela

SHELL, pelo AI e pelo programa SHRP, já apresentadas neste trabalho no capítulo I, respectivamente as expressões (1.14), (1.15) e (1.16), sendo no entanto as duas primeiras as de utilização mais corrente [72].

A aplicação destas três expressões para os valores da extensão de tracção utilizados nos ensaios e para os valores da rigidez obtidos, permitiu determinar os parâmetros das leis de fadiga correspondentes. Os valores obtidos são apresentados no quadro V.1.

Quadro V.1 Parâmetros e coeficientes de correlação das leis de fadiga segundo os modelos da SHELL, AI e SHRP para a mistura estudada

Modelo	Parâmetros e coeficiente de correlação	MCC	MMC	MPS	MPI
SHELL	a	3269,4	4470,1	3184,5	2918,7
	b	-0,2034	-0,218	-0,2004	-0,2069
	R ²	99,87	99,93	99,87	99,74
AI	a	13331,1	17821,3	13878,2	11671,0
	b	-0,3077	-0,3231	-0,3043	-0,3115
	R ²	99,92	99,97	99,93	99,87
SHRP	a	5149,5	10002,3	4731,2	4520,8
	b	-0,2481	-0,2793	-0,2447	-0,2477
	R ²	99,06	99,74	99,75	99,26

Nota: Na expressão desenvolvida pelo programa SHRP apresentada no capítulo I (1.16), o produto $S_f \cdot 2,738 \times 10^5$ foi substituído pelo valor 0,3591, de acordo com a mais recente actualização daquela expressão [73].

No quadro V.2 são apresentados os valores da vida à fadiga em termos de número de ciclos até à ruína, obtidos experimentalmente através dos ensaios realizados e pela aplicação das três metodologias. O valor da extensão de tracção utilizado foi de $75,6 \times 10^{-6} \mu\epsilon$,

correspondente ao valor observado no dimensionamento da mistura de macadame betuminoso [50].

Quadro V.2 Valores do número de ciclos de carga até à ruína, para uma extensão de tracção de $75,6 \times 10^{-6} \mu\epsilon$, obtidos nos ensaios laboratoriais e por aplicação das expressões da SHELL, AI e SHRP

Referência da mistura betuminosa	MCC	MMC	MPS	MPI
Obtido em laboratório	$96,9 \times 10^6$	$16,1 \times 10^6$	$41,6 \times 10^6$	$39,4 \times 10^6$
Metodologia SHELL	$110,4 \times 10^6$	$134,1 \times 10^6$	$127,7 \times 10^6$	$46,6 \times 10^6$
Metodologia AI	$20,0 \times 10^6$	$22,0 \times 10^6$	$27,5 \times 10^6$	$10,6 \times 10^6$
Metodologia SHRP	$24,5 \times 10^6$	$39,5 \times 10^6$	$22,0 \times 10^6$	$14,9 \times 10^6$

A análise dos valores apresentados no quadro V.2 permite concluir que, o modelo da SHELL é aquele que melhor se aproxima dos valores obtidos em laboratório, para a mistura definida para a obra (MCC). No entanto os valores obtidos por esta expressão para as misturas (MMC) e (MPS) afastam-se um pouco dos valores obtidos em laboratório. Este aspecto pode eventualmente ser devido ao facto da expressão não contemplar um parâmetro que tenha em conta a variação da porosidade da mistura. Os valores obtidos pelas metodologias AI e SHRP são muito idênticos entre si e um pouco inferiores aos obtidos experimentalmente. Parece pois notar-se uma tendência para o facto destes modelos subestimarem a vida à fadiga das misturas betuminosas.

A análise dos gráficos das leis de fadiga obtidas experimentalmente, bem como a comparação desses resultados com os obtidos pelas expressões, permite concluir :

- Das misturas ensaiadas, aquela que apresenta melhor comportamento à fadiga é a referenciada por macadame compactação corrente (MCC), ou seja, a mistura formulada para utilização em obra. Por outro lado, a mistura com menor compactação é a que pior comportamento à fadiga apresenta. Este aspecto vem alertar para o facto de se verificarem grandes variações do comportamento à fadiga

- das misturas betuminosas, com a alteração da porosidade. É pois de realçar as considerações já formuladas anteriormente sobre a necessidade de proceder a um cuidadoso controlo da compactação das misturas em obra;
- A mistura com menor compactação verifica grande dispersão de resultados, aspecto evidenciado pelo baixo valor do coeficiente de correlação obtido;
 - O ângulo de fase não observa grande variação de valores para as diferentes misturas, verificando-se no entanto, o que seria de esperar, valores mais baixos para as misturas com menor compactação e com percentagem de betume mais baixa.
 - Quanto à energia dissipada acumulada verifica-se uma boa correlação entre a lei associada à variação desta característica com o número de ciclos de carga. Verifica-se por outro lado um comportamento muito idêntico das misturas para as quais se fez variar a percentagem em betume, muito diferente porém do comportamento apresentado pela mistura com menor compactação.
 - Nenhuma das três metodologias de previsão da vida à fadiga analisadas demonstrou possuir perfeita concordância, ou mesmo uma relação linear, com os valores obtidos experimentalmente, pelo que parece não serem os modelos totalmente adequados ao tipo de mistura betuminosa ensaiada.

5.3 Prosseguimento de trabalhos futuros

O estudo laboratorial do comportamento à fadiga de misturas betuminosas, como o desenvolvido neste trabalho, deveria ser prosseguido, realizando a observação e a auscultação de trechos piloto, procurando obter correlações entre os resultados obtidos em laboratório e os resultados observados no pavimento. O estabelecimento dessas correlações, para além de ajudar na compreensão do fenómeno da fadiga nos pavimentos flexíveis, permitiria estabelecer especificações que conduziriam ao dimensionamento dos pavimentos mais de acordo com a realidade, e estabelecer regras construtivas por forma a melhorar definitivamente o desempenho das misturas nas camadas do pavimento.

Outros estudos de comportamento à fadiga devem ser desenvolvidos, para outras misturas betuminosas, com outros betumes e com outros tipos de agregados, procurando aferir

e eventualmente ajustar, as expressões de previsão da vida à fadiga dos modelos existentes, para as misturas utilizadas no nosso país.

No trabalho desenvolvido não foram considerados dois aspectos fundamentais:

- os processos de envelhecimento do betume constituinte da mistura, que naturalmente conduzem a uma redução do tempo de vida das misturas betuminosas [74];
- o efeito do tempo de repouso entre carregamentos sucessivos no comportamento das misturas betuminosas à fadiga [75].

Pensamos serem estes alguns dos aspectos que deverão ser considerados em futuros trabalhos de investigação, procurando estudar estes fenómenos tendo em conta a realidade portuguesa no que diz respeito aos agregados utilizados em Portugal e às condições climáticas observadas no nosso país.



BIBLIOGRAFIA

- [1] Gontijo, P. R. (1979) - Contribuição para o Estudo do Comportamento de Misturas Betuminosas à Fadiga por Flexão Dinâmica, sob a Acção de Cargas Rolantes Repetidas, Tese para a obtenção do grau de Especialista pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil, LNEC, Lisboa.
- [2] Azevedo, M. C. M. (1993) - Características Mecânicas de Misturas Betuminosas para Camadas de Base de Pavimentos, Tese para obtenção de grau de Doutor, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.
- [3] Pais, J. C. (1999) - Consideração da Reflexão de Fendas no Dimensionamento de Reforços de Pavimentos Flexíveis, Tese para a obtenção do grau de Doutor, Universidade do Minho, Braga.
- [4] Deacon, J. A.; Tayebali A. A.; Rowe G.M.; Monismith C.L. (1995) - Validation of SHRP A-003A Flexural Beam Fatigue Teste, ASTM - STP 1265, Philadelphia.
- [5] AASHTO (1993) - AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C..
- [6] JAE, Junta Autónoma de Estradas. Direcção de Serviços de Conservação (1997) - Catálogo de Degradações de Pavimentos Flexíveis, Lisboa.
- [7] Shell Bitumen (1990) - The Shell Bitumen Handbook, Shell Bitumen, U.K..
- [8] ASTM D5-97 (1997) - Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials, ASTM.
- [9] ASTM D36-86 (Reapproved 1993) - Standard Test Method for Softening Point of Bitumen (Ring-and-Ball Apparatus), ASTM.
- [10] LNEC E 80-97 (1997) - "Betumes e Ligantes Betuminosos, Betumes de Pavimentação. Classificação, propriedades e exigências de conformidade, LNEC, Lisboa."

- [11] Roberts F. L.; Kandhal P.S.; Brown E.R.; Lee D.Y.; Kennedy T.W. (1996) - Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design and Construction, E.U.A.
- [12] Asphalt Institute (1997) - Superpave Series nº 1 (SP-1), Performance Graded Asphalt Binder Specification and Testing, E.U.A..
- [13] Asphalt Institute (1997) - Superpave Series nº 2 (SP-2), Superpave Mix Design, E.U.A..
- [14] Sousa, J.B.; Prates, M.; Barros, R.; Diniz, B.- Efeito do tipo de agregado na performance à fadiga e deformação permanente de Misturas Betuminosas.
- [15] Kliewer, J.E.; Bell, C.A.; Sosnovske, D.A. (1995) - Investigation of the relationship Between Field Performance and Laboratory Aging Properties of Asphalt Mixtures, ASTM - STP 1265, Philadelphia.
- [16] European Standard TC 227 Work Item 00227132 " Test Methods for Hot Mix Asphalt - Stiffness ", 3rd WG 1 draft (Nov.1997), CEN.
- [17] Norrison, H.; Holden, J.; McManus,K. (2000) - Modelling of Crack Initiation and Growth in Flexible Pavements for Urban Local Roads, 2nd Eurasphalt & Eurobitume Congress, Barcelona.
- [18] Arand, W. (2000) - New Ideas on the Resistance of Asphalt to Fatigue, 2nd Eurasphalt & Eurobitume Congress, Barcelona.
- [19] Sousa, J.B. - Avaliação dos métodos de ensaio e especificações SHRP na Europa, tarefa F - Avaliação após construção, Anal Regional de Lisboa.
- [20] Molenaar, J.M.M.; Molenaar, A.A.A.(2000) – Fracture toughness of asphalt in the semi-circular bend test, 2nd Eurasphalt & Eurobitume Congress, Barcelona.
- [21] Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées (1985) - Cours de Routes-Couches de Roulement.
- [22] Renken, Peter (2000)-Influence of specimen preparation onto the mechanical behaviour of asphalt aggregate mixtures, 2nd Eurasphalt & Eurobitume Congress, Barcelona.
- [23] Gourdon, J.L.; Clifford, J.; Hobeda,P.; Pronk,A; Brosseaud,Y. (2000) - Effect of compaction method on mechanical properties of asphalt mixtures DG XII - SMT Programme-Contract SM4-CT98-2244, 2nd Eurasphalt & Eurobitume Congress, Barcelona.

- [24] Pré- Norma Europeia prEN 12697 - 30. "Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 30: Specimen preparation, impact compactor."
- [25] Norma Portuguesa NP 142/68 - "Misturas Betuminosas. Ensaio de compressão Marshall."
- [26] Norma Americana ASTM D1559-89 - "Standard Test Method for Resistance to Plastic Flow of Bituminous Mixtures Using Marshall Apparatus."
- [27] Norma Inglesa BS 1377-4/75- "Methods os test for soils for Civil Engineering purposes, Test 14. Determination of the dry density/moisture content relationship of granular soil - Vibrating hammer method."
- [28] Pré- Norma Europeia prEN 12697 - 32. "Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 32: Laboratory compaction of bituminous mixtures by a vibratory compactor."
- [29] Norma Francesa NF P98-251-1 - "Essais relatifs aux chaussées. Essais statiques sur mélanges hydrocarbonés. Partie 1: Essai DURIEZ sur mélanges hydrocarbonés à chaud."
- [30] Norma Americana ASTM D 4013 - "Standard Practice for Preparation of Test Specimens of Bituminous Mixtures by Means of Gyratory Shear Compactor."
- [31] Norma Francesa NF P98-252 - "Essais relatifs aux chaussées. Détermination du comportement au compactage des mélanges hydrocarbonés. Essai de compactage à la presse à cisaillement giratoire (PCG)."
- [32] Pré- Norma Europeia prEN 12697 - 31. "Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 31: Specimen preparation, gyratory compactor."
- [33] Moutier, F (1993) Utilisation de la presse à cisaillement giratoire et de l'orniéreur dans la méthode française de formulation des enrobé bitumineux, 5º Congresso Eurobitume em Estocolmo.
- [34] Corté, J.F. - Regard sur la formulation des enrobé bitumineux à travers l'approche française.
- [35] Norma Americana ASTM D 1561 - "Standard Practice for Preparation of Bituminous Mixtures Test Specimens by Means of California Kneading Compactor."
- [36] Norma Americana ASTM D 3202 - "Standard Practice for Preparation of Bituminous Mixtures Beam Specimens by Means of the California Kneading Compactor."

- [37] Pré- Norma Europeia prEN 12697 - 33. "Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 33: Specimen preparation slab compactor."
- [38] Norma Francesa NF P98-250-2. "Essais relatifs aux chaussées. Préparation des mélanges hydrocarbonés. Partie 2: Compactage des plaques."
- [39] Sousa, J.B.; Fonseca, P.; Freire, A .; Pais, J. - Comparação da vida à fadiga e deformação permanente entre misturas com betume modificado com borracha reciclada de pneus e convencionais.
- [40] Norma Americana ASTM D 4123-82 (Reapproved 1995) - "Standard Test Method for Indirect Tension Test Resilient Modulus of Bituminous Mixtures."
- [41] Pré-norma inglesa BS DD 213 - 1993 "Method for the determination of the indirect tensile stiffness modulus of bituminous mixtures."
- [42] prEN 12697-26 - "Bituminous Mixtures - Test Methods for Hot Mix Asphalt - Part 26: Stiffness."
- [43] Pré-norma inglesa BS DD ABF 1997 - "Method for the determination of the fatigue characteristics of bituminous mixures using indirect tensile fatigue."
- [44] Sousa, J.B. (2000) - Caracterização Mecânica de Misturas Betuminosas: rigidez, resistência à fadiga e às deformações permanentes. Ensaio. Normalização. Comunicação inserida no Encontro "A Qualidade na Construção", realizado no CICCOPN.
- [45] Norma Francesa NF P 98-261-1 "Essais relatifs aux chaussées. Détermination de la résistance en fatigue des mélanges hydrocarbonés."
- [46] Pré-norma europeia prEN 12697-24 "Bituminous Mixtures - Test Method for Hot Mix Asphalt - Part 24: Resistance to Fatigue."
- [47] Norma Americana AASHTO TP8-94 (Reapproved 1996). "Standard Test Method for Determining the Fatigue Life of Compacted Hot Mix Asphalt (HMA) Subjected to Repeated Flexural Bending."
- [48] Beam Fatigue Apparatus - Industrial Process Controls (1999), Manual de instruções do equipamento.
- [49] Memória geral do Projecto de Execução da COBA, referente ao 2º Sublanço do IC 25 - Via Rápida de Gondomar.
- [50] Volume 03 - Pavimentação do Projecto de Execução da COBA, referente ao 2º Sublanço do IC 25 - Via Rápida de Gondomar.

- [51] ICOR (1999) - Apresentação da obra "IC 25 - Via Rápida de Gondomar (2º Sublanço)."
- [52] Especificação LNEC E 237/70 "Agregados - Ensaio de desgaste na máquina de Los Angeles."
- [53] Norma Inglesa BS 812: Section 105.1:1989 "Testing aggregates, Part 105. Methods for determination of particle shape. Section 105.1 Flakiness index."
- [54] Norma Inglesa BS 812: Section 105.2:1990 "Testing aggregates, Part 105. Methods for determination of particle shape. Section 105.2 Elongation index of coarse aggregate."
- [55] Especificação LNEC E 199/67 - "SOLOS. Ensaio de equivalente de areia."
- [56] Norma Portuguesa NP-143/69 - "Solos - Determinação dos limites de consistência."
- [57] APORBET- Misturas Betuminosas, Contribuição para a normalização do fabrico e da aplicação
- [58] Especificação LNEC E 385/93 - "Filer calcário para betões. Determinação do valor azul de metileno."
- [59] Norma Portuguesa NP-581/69 - "Inertes para Argamassas e Betões - Determinação das massas volúmicas e da absorção de água de britas e godos."
- [60] Norma Portuguesa NP-954/73 - "Inertes para Argamassas e Betões - Determinação das massas volúmicas e da absorção de água de areias."
- [61] Especificação LNEC E 233/69 - "AGREGADOS. Análise granulométrica."
- [62] Especificação LNEC E 234/69 - "AGREGADOS. Análise granulométrica de filer."
- [63] Especificação LNEC E 64/79 - "CIMENTOS. Determinação da massa volúmica."
- [64] Norma Americana ASTM D 5-95 - "Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials."
- [65] Norma Americana ASTM D 36-86 (reapproved 1993) - "Standard Test Method for Softening Point of Bitumen (Ring-and-Ball Apparatus)."
- [66] Norma Americana ASTM D 2041-95 - "Standard Test Method for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Bituminous Mixures."
- [67] Norma Americana ASTM D 2726-93a - "Standard Test Method for Bulk Specific Gravity and Density of Compacted Bituminous Mixures Using Saturated Surface-Dry Specimens."

- [68] Deacon, J.A.; Leahy, R.B.; Monismith, C.L. (1995) Mix testing and Analysis Systems Resulting from SHRP Contract A-003A Proceedings of the 1995 Conference of Transportation Congress.
- [69] Rada, G.R.; Richter, C.A.; Jordahl, P. (1994) SHRP's Layer Moduli Backcalculation Procedure. Nondestructive Testing of Pavements and Backcalculation of Moduli (second volume), ASTM STP 1198.
- [70] Especificação LNEC E 268/73 - "Misturas betuminosas. Determinação do teor em betume e do teor em água com o extractor de Kumagawa."
- [71] Pell, P.S. (1987) Pavement Materials. Sixth International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements. University of Michigan U.S.A .
- [72] Shook, J. F.; Finn, F. N.; Witczak, M. W.; Monismith, C. L.. (1982) - Thickness design of asphalt pavements - The Asphalt Institute Method. Fifth International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements. University of Michigan U.S.A .
- [73] European Cooperation in the field of Scientific and Technical Research (1999) Cost 333- Development of New Bituminous Pavement Design Method.
- [74] Brown, S.F.; Scholz, T.V. (2000) Development of Laboratory protocols for the aging of asphalt mixtures, 2nd Eurasphalt & Eurobitume Congress, Barcelona.
- [75] de la Roche, C.; Breyse, D.; Bruhat, S. Chauvin, J. (2000) Fatigue des enrobes bitumineux. Influence des temps de repos sur la recuperation de rigidite en cours d'essai, 2nd Eurasphalt & Eurobitume Congress, Barcelona.



FACULDADE DE ENGENHARIA

UNIVERSIDADE DO PORTO

BIBLIOTECA



0000060187