

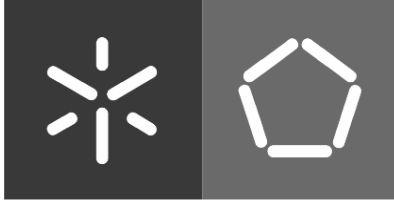


Hugo Manuel Ribeiro Dias da Silva

**CARACTERIZAÇÃO DO MASTIQUE
BETUMINOSO E DA LIGAÇÃO
AGREGADO-MASTIQUE**
Contribuição para o Estudo do
Comportamento das Misturas Betuminosas

Universidade do Minho
Escola de Engenharia





Universidade do Minho

Escola de Engenharia

Hugo Manuel Ribeiro Dias da Silva

**CARACTERIZAÇÃO DO MASTIQUE
BETUMINOSO E DA LIGAÇÃO
AGREGADO-MASTIQUE**

**Contribuição para o Estudo do
Comportamento das Misturas Betuminosas**

Tese de Doutoramento

Engenharia Civil – Vias de Comunicação

Trabalho efectuado sob a orientação do

Professor Doutor Jorge Carvalho Pais

Outubro de 2005

É autorizada a reprodução integral desta tese/trabalho apenas para efeitos de investigação, mediante declaração escrita do interessado, que a tal se compromete.

Assinatura do autor

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado na Universidade do Minho sob orientação do Doutor Jorge Carvalho Pais, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho.

Este trabalho desenvolveu-se devido ao apoio de várias pessoas e entidades, às quais quero manifestar o meu reconhecimento.

A concretização deste trabalho só foi possível com as condições e meios postos à disposição pelo Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, sobretudo pelo responsável do Sub-Grupo disciplinar de Vias de Comunicação, Doutor Paulo António Alves Pereira, a quem desejo expressar o meu agradecimento.

Ao Doutor Jorge Carvalho Pais devo a orientação, os esclarecimentos prestados e o incentivo na selecção do tema do trabalho. Quero ainda expressar a minha gratidão, pelo apoio e esforço dispendido na concretização deste trabalho e pela leitura atenta e crítica do texto original.

Ao Doutor Paulo António Alves Pereira, Professor Catedrático do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, desejo manifestar o meu agradecimento à disponibilidade e ao interesse sempre demonstrados, às sugestões dadas e à análise crítica do texto original.

Aos meus colegas de trabalho, nomeadamente aos do Sub-Grupo disciplinar de Vias de Comunicação, Doutora Elisabete Freitas e Engenheiro Joel Oliveira, quero agradecer o interesse, o encorajamento e o apoio com que acompanharam a presente investigação.

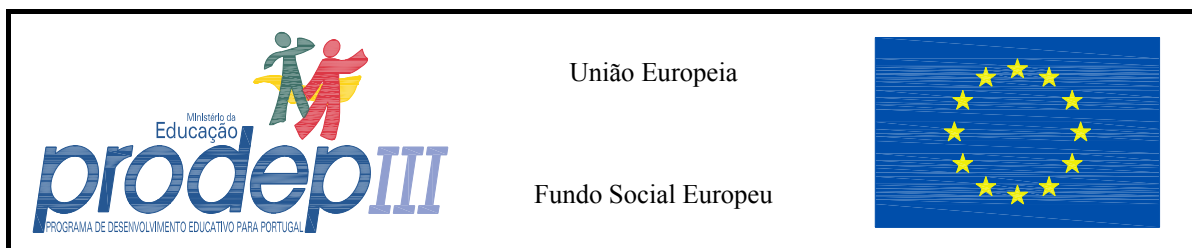
Aos Técnicos do Laboratório de Engenharia Civil da Universidade do Minho, em particular aos que colaboraram directamente na realização do presente trabalho, Carlos Palha e Carlos Manuel, desejo agradecer pelo cuidado e dedicação demonstrados durante a execução dos trabalhos laboratoriais.

Às empresas Petrogal, Pedreira Bezerras e Alberto Couto Alves, agradeço a atenção demonstrada e as facilidades concedidas, designadamente no fornecimento dos materiais utilizados nas misturas betuminosas.

À minha família e aos meus amigos, quero agradecer a compreensão e o apoio durante a elaboração deste trabalho.

Por fim, dedico este trabalho à Luísa, aos meus pais, à minha irmã e à minha tia, pela compreensão, cumplicidade, apoio incessante e por tudo aquilo que tornou possível a concretização deste trabalho. Partilhamos todo este trajecto e, como tal, as palavras não bastam.

Trabalho de investigação co-financiado pelo Fundo Social Europeu, através do Programa de Desenvolvimento Educativo para Portugal, designadamente a Medida 5 / Acção 5.3 – Formação Avançada de Docentes do Ensino Superior, e pelo Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho



CARACTERIZAÇÃO DO MASTIQUE BETUMINOSO E DA LIGAÇÃO AGREGADO-MASTIQUE

Contribuição para o Estudo do Comportamento das Misturas Betuminosas

RESUMO

Nas últimas décadas, os pavimentos rodoviários flexíveis têm sido sujeitos à acção de um tráfego cada vez mais intenso e agressivo, o que tem originado, em vários casos, a sua degradação prematura. De modo a suportar essas elevadas solicitações, é necessário melhorar o comportamento estrutural e funcional dos pavimentos, o que pode ser conseguido, melhorando as propriedades da fundação, das camadas granulares e das camadas betuminosas, ou aumentando a espessura das camadas granulares e betuminosas.

Actualmente, uma parte significativa dos investimentos na rede rodoviária portuguesa é empregue na reabilitação de pavimentos, que é realizada, habitualmente, sem modificar a fundação e as camadas granulares. Assim, justifica-se este estudo, relacionado com o comportamento das misturas betuminosas, pela influência determinante no desempenho estrutural e funcional dos pavimentos novos e dos reforços de pavimentos.

O principal objectivo deste trabalho foi o de contribuir para o estudo do comportamento das misturas betuminosas através da caracterização dos seus componentes, nomeadamente o mastique betuminoso e a ligação agregado-mastique. Além disso, procurou desenvolver-se um modelo microestrutural e heterogéneo de previsão do comportamento das misturas betuminosas baseado nas características dos seus componentes.

Inicialmente, fez-se uma síntese dos conhecimentos sobre o comportamento das misturas betuminosas, do mastique betuminoso e da ligação agregado-mastique. Também se analisou a presença de água nas misturas betuminosas e o envelhecimento do betume devido à influência que estes têm na ligação agregado-mastique. O trabalho experimental consistiu no estudo da composição e do comportamento do mastique betuminoso, na implementação de ensaios para estudo da ligação agregado-mastique, na avaliação da influência do mastique no comportamento das misturas betuminosas e na análise da fiabilidade dos ensaios desenvolvidos. Finalmente, com base nas características fundamentais do mastique e da ligação agregado-mastique, desenvolveu-se um modelo microestrutural e heterogéneo para previsão do comportamento das misturas betuminosas.

Com os resultados deste trabalho procurou analisar-se a composição do mastique betuminoso e avaliar-se a influência da composição das misturas betuminosas e das condições de ensaio no comportamento do mastique, da ligação agregado-mastique e das misturas betuminosas. Os resultados dos ensaios experimentais também foram utilizados para calibrar o modelo microestrutural e heterogéneo desenvolvido para previsão do comportamento das misturas betuminosas. Com este modelo pretendeu estudar-se a distribuição de tensões e extensões nas misturas betuminosas, assim como o seu fendilhamento.

Nas condições de estudo foi possível concluir que o mastique tem uma maior influência no comportamento das misturas betuminosas do que a ligação agregado-mastique. A composição do mastique influenciou significativamente o comportamento das misturas betuminosas. A utilização dum betume mais duro e dum filer calcário melhorou o desempenho das misturas betuminosas, assim como o envelhecimento do betume antes da compactação das misturas. Os ensaios desenvolvidos neste trabalho conseguiram avaliar adequadamente as propriedades do mastique e das misturas betuminosas numa forma mais rápida e com menores custos. O modelo de previsão do comportamento das misturas betuminosas desenvolvido neste trabalho permitiu analisar os locais com tensões e extensões máximas onde ocorre preferencialmente a rotura das misturas betuminosas.

Palavras-Chave:

Misturas Betuminosas
Comportamento Mecânico
Mastique Betuminoso
Ligação Agregado-Mastique
Envelhecimento
Sensibilidade à Água
Ensaio Laboratoriais
Módulo de Rigidez
Resistência à Fadiga
Resistência às Deformações Permanentes
Modelo de Elementos Finitos
Micromecânica

CHARACTERISATION OF THE BITUMINOUS MASTIC AND THE AGGREGATE-MASTIC BOND

Contribution to the Study of the Bituminous Mixtures' Behaviour

ABSTRACT

During the last decades, the flexible road pavements have been subjected to a more intense and aggressive traffic, which has often caused their premature degradation. In order to support these high solicitations, it is pertinent to improve the structural and functional behaviour of the pavements. This can be achieved by improving the properties of the subgrade, the granular and the bituminous layers, or by increasing the thickness of the granular and bituminous layers.

Presently, a significant part of the investments on the Portuguese road network is used in the pavements' rehabilitation, which is usually done without changing neither the subgrade nor the granular layers. Thus, this study, related to the bituminous mixtures' behaviour, is justified, because of their decisive influence on the structural and functional performance of the new pavements and of the pavements' overlays.

The main aim of this work was to contribute to the study of the bituminous mixtures' behaviour through the characterisation of their components, namely the bituminous mastic and the aggregate-mastic bond. Moreover, it was intended to develop a heterogeneous microstructural model of prevision of the bituminous mixtures' behaviour, based on the characteristics of their components.

Initially, the knowledge concerning the bituminous mixtures' behaviour, the bituminous mastic and the aggregate-mastic bond was synthesised. It was also analysed the presence of water in the bituminous mixtures and the bitumen ageing, due to their influence on the aggregate-mastic bond. The experimental work consisted in the study of the bituminous mastic's composition and behaviour, in the implementation of tests to study the aggregate-mastic bond, in the evaluation of the mastic's influence on the bituminous mixtures' behaviour and in the analysis of the developed tests' reliance. Finally, based on the fundamental characteristics of the mastic and the aggregate-mastic bond, it was developed a heterogeneous microstructural model to predict the bituminous mixtures' behaviour.

With the results of this work, it was intended to analyse the bituminous mastic's composition and to evaluate the influence that the bituminous mixtures' composition and the test's conditions have on the behaviour of the mastic, the aggregate-mastic bond and the bituminous mixtures. The experimental tests' results were also used to calibrate the developed heterogeneous microstructural model, so as to predict the bituminous mixtures' behaviour. With this model, it was intended to study the distribution of tensions and extensions in the bituminous mixtures, as well as their cracking.

For the studied conditions, it was possible to conclude that the mastic has a bigger influence on the bituminous mixtures' behaviour than the aggregate-mastic bond. The mastic's composition significantly influenced the bituminous mixtures' behaviour. The use of harder bitumen and limestone filler improved the bituminous mixtures' performance, as well as the bitumen's ageing before the mixture's compaction. The tests developed in this work could adequately evaluate the properties of the mastic and the bituminous mixtures with fewer costs and faster. The model of prevision of the bituminous mixtures' behaviour, developed in this work, allowed the analysis of the places with maximum tensions and extensions, where the bituminous mixtures' rupture preferably occurs.

Key-Words:

Bituminous Mixtures
Mechanical Behaviour
Bituminous Mastic
Aggregate-Mastic Bond
Ageing
Water Sensitivity
Laboratorial Tests
Stiffness Modulus
Fatigue Resistance
Rutting Resistance
Finite Element Model
Micromechanics

ÍNDICE

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO	1
1.1. Enquadramento Temático	1
1.2. Objectivos e Fases do Trabalho	4
1.3. Conteúdo da Tese	5

CAPÍTULO 2

COMPORTAMENTO DAS MISTURAS BETUMINOSAS	7
2.1. Introdução	7
2.2. Constituição e Comportamento dos Pavimentos Rodoviários Flexíveis	9
2.3. Caracterização das Misturas Betuminosas	15
2.3.1. Composição, Estrutura, Reologia e Caracterização do Ligante Betuminoso	15
2.3.2. Caracterização dos Agregados	26
2.3.3. Influência do Comportamento das Misturas Betuminosas no Desempenho dos Pavimentos Rodoviários Flexíveis	29
2.3.4. Composição das Misturas Betuminosas	30
2.3.5. Formulação de Misturas Betuminosas	35
2.4. Condições para Realização dos Ensaios de Caracterização das Misturas Betuminosas	50
2.5. Características de Rigidez das Misturas Betuminosas	52
2.6. Características de Fadiga das Misturas Betuminosas	57
2.7. Características de Resistência às Deformações Permanentes das Misturas Betuminosas	63
2.8. Factores que Influenciam o Comportamento das Misturas Betuminosas	64
2.9. Conclusões	67

CAPÍTULO 3

MASTIQUE BETUMINOSO E LIGAÇÃO AGREGADO-MASTIQUE	71
3.1. Introdução	71
3.2. Definição de Mastique Betuminoso	72
3.3. Composição e Comportamento do Mastique Betuminoso	74
3.4. Influência do Mastique no Comportamento das Misturas Betuminosas	81
3.5. Mecanismos de Ligação e Rotura da Ligação Agregado-Mastique	89
3.6. Factores Determinantes no Comportamento da Ligação Agregado-Mastique em Serviço	101
3.6.1. Envelhecimento do Betume	101
3.6.2. Presença de Água nas Misturas Betuminosas	109
3.7. Ensaio de Caracterização do Comportamento da Ligação Agregado-Mastique	112
3.7.1. Ensaio para Simulação do Envelhecimento do Betume	113
3.7.2. Ensaio para Simulação da Sensibilidade à Água das Misturas Betuminosas	127
3.8. Aditivos e Tratamentos “Anti-descolagem”	138
3.9. Conclusões	141

CAPÍTULO 4

CARACTERIZAÇÃO DO MASTIQUE EXISTENTE NAS MISTURAS BETUMINOSAS	145
4.1. Introdução	145
4.2. Caracterização dos Materiais e das Misturas Betuminosas em Estudo	146
4.2.1. Caracterização do Ligante Betuminoso e dos Agregados	147
4.2.2. Formulação das Misturas Betuminosas	149
4.3. Determinação da Composição do Mastique Existente nas Misturas Betuminosas	151
4.3.1. Definição da Metodologia a Utilizar	151
4.3.2. Composição das Fracções Granulométricas das Misturas Betuminosas	156
4.3.3. Composição do Mastique	157
4.3.4. Análise da Composição do Mastique em Função das Propriedades das Misturas Betuminosas	161

4.4. Procedimento Analítico para Definição do Mastique Existente numa Mistura Betuminosa	165
4.5. Ensaios para Caracterização do Comportamento Mecânico dos Mastiques	168
4.5.1. Mastiques Betuminosos em Estudo	169
4.5.2. Características Volumétricas dos Mastiques Betuminosos	170
4.5.3. Definição dos Ensaios para Caracterização do Comportamento dos Mastiques Betuminosos	172
4.6. Comportamento dos Mastiques nos Ensaios Monotónicos	180
4.6.1. Comportamento dos Mastiques em Compressão	180
4.6.2. Comportamento dos Mastiques em Corte	185
4.6.3. Comportamento dos Mastiques em Tracção	189
4.7. Comportamento dos Mastiques em Ensaios Axiais de Compressão/Tracção Repetida	193
4.7.1. Rigidez dos Mastiques	193
4.7.2. Resistência à Fadiga dos Mastiques	196
4.8. Comportamento dos Mastiques em Ensaios de Compressão e de Corte Repetido	199
4.8.1. Resistência à Deformação Permanente dos Mastiques em Compressão	199
4.8.2. Resistência à Deformação Permanente dos Mastiques em Corte	201
4.9. Comportamento de Mastiques Betuminosos com Betume e Filer	204
4.10. Conclusões	207

CAPÍTULO 5

CARACTERIZAÇÃO DA LIGAÇÃO AGREGADO-MASTIQUE	209
5.1. Introdução	209
5.2. Factores Condicionantes do Comportamento da Ligação Agregado-Mastique	213
5.3. Definição dos Provetes de Ensaio	215
5.4. Ensaios para Caracterização do Comportamento Mecânico da Ligação Agregado-Mastique	217
5.4.1. Materiais Utilizados e Variáveis em Estudo	217
5.4.2. Características Volumétricas dos Provetes de Ensaio	218
5.4.3. Definição dos Ensaios para Caracterização do Comportamento da Ligação Agregado-Mastique	220

5.5. Comportamento Mecânico da Ligação Agregado-Mastique	221
5.5.1. Comportamento da Ligação Agregado-Mastique nos Ensaios Monotônicos de Corte	222
5.5.2. Comportamento da Ligação Agregado-Mastique nos Ensaios Monotônicos de Tracção	230
5.6. Correlação entre o Comportamento da Ligação Agregado-Mastique e a Coesão Interna do Mastique	238
5.7. Conclusões	240

CAPÍTULO 6

CARACTERIZAÇÃO DAS MISTURAS BETUMINOSAS PREPARADAS COM DIFERENTES MASTIQUES BETUMINOSOS

243

6.1. Introdução	243
6.2. Procedimento Analítico para Definição de uma Mistura Betuminosa em Função do Mastique Betuminoso	244
6.3. Misturas Betuminosas em Estudo	245
6.4. Ensaios para Caracterização do Comportamento Mecânico das Misturas Betuminosas	247
6.4.1. Características Volumétricas das Misturas Betuminosas	248
6.4.2. Definição dos Ensaios para Caracterização do Comportamento das Misturas Betuminosas	249
6.5. Comportamento das Misturas Betuminosas nos Ensaios Monotônicos	257
6.5.1. Comportamento das Misturas Betuminosas em Compressão	257
6.5.2. Comportamento das Misturas Betuminosas em Corte	263
6.5.3. Comportamento das Misturas Betuminosas em Tracção	268
6.6. Comportamento das Misturas Betuminosas em Ensaios Axiais de Compressão/Tracção Repetida	272
6.6.1. Rigidez das Misturas Betuminosas	272
6.6.2. Resistência à Fadiga das Misturas Betuminosas	275
6.7. Comportamento das Misturas Betuminosas no Ensaio de Flexão Repetida em Quatro Pontos	277
6.7.1. Rigidez das Misturas Betuminosas	277
6.7.2. Resistência à Fadiga das Misturas Betuminosas	280

6.8. Comportamento das Misturas Betuminosas no Ensaio de Corte Repetido com Altura Constante (RSST-CH)	282
6.8.1. Rigidez das Misturas Betuminosas	282
6.8.2. Resistência à Deformação Permanente das Misturas Betuminosas	286
6.9. Correlação entre o Comportamento do Mastique e das Misturas Betuminosas	288
6.10. Correlação entre os Ensaios Normalizados e os Ensaios Desenvolvidos para Estudar o Mastique e a Ligação Agregado-Mastique	295
6.11. Conclusões	300

CAPÍTULO 7

PREVISÃO DO COMPORTAMENTO DAS MISTURAS BETUMINOSAS	303
7.1. Introdução	303
7.2. Modelos de Previsão do Comportamento das Misturas Betuminosas	305
7.3. Modelação do Comportamento dos Mastiques Betuminosos em Estudo	328
7.4. Modelação do Comportamento das Misturas Betuminosas em Estudo	333
7.5. Utilização dos Modelos Analisados na Previsão do Comportamento de outras Misturas Betuminosas	339
7.6. Conclusões	343

CAPÍTULO 8

CONCLUSÃO	345
8.1. Síntese do Trabalho e Conclusões Finais	345
8.2. Trabalho Futuro	350

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	351
---	------------

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 –	Constituição tipo dum pavimento rodoviário flexível	10
Figura 2.2 –	Representação esquemática das solicitações e do modo de funcionamento dum pavimento rodoviário flexível	11
Figura 2.3 –	Estrutura química tipo das fracções de asfaltenos, aromáticos e saturados dum betume (Whiteoak, 1990)	17
Figura 2.4 –	Variação do envelhecimento e alterações na composição do betume durante a mistura, espalhamento e vida em serviço no pavimento (Whiteoak, 1990)	20
Figura 2.5 –	Esquema representativo do ensaio de penetração (Asphalt Institute, 1989)	21
Figura 2.6 –	Ensaio para determinação do ponto de amolecimento pelo método do anel e bola (Pereira e Picado-Santos, 2002)	21
Figura 2.7 –	Diagrama BTCD: viscosidades “ideais” para a mistura e compactação de misturas betuminosas (Heukelom, 1970)	24
Figura 2.8 –	Determinação da granulometria dos agregados (Asphalt Institute, 1989)	27
Figura 2.9 –	Composição volumétrica duma mistura betuminosa (adaptado de Asphalt Institute, 1989)	31
Figura 2.10 –	Representação esquemática da relação entre as diferentes massas volúmicas do material granular de uma mistura betuminosa (Capitão, 1996)	31
Figura 2.11 –	Equipamento utilizado no ensaio de Marshall e esquema do resultado tipicamente obtido (adaptado de Capitão, 1996)	44
Figura 2.12 –	Gráficos dos valores médios obtidos para cada teor em betume, relativos às variáveis estudadas no Método de Marshall (Capitão, 1996)	45
Figura 2.13 –	Representação esquemática das tensões que ocorrem num elemento do pavimento durante a passagem da roda de um veículo (Whiteoak, 1990)	51
Figura 2.14 –	Tensões induzidas pela passagem da roda de um veículo ao longo do tempo (Whiteoak, 1990)	52
Figura 2.15 –	Curva mestra para uma temperatura de referência de 10 °C (adaptado de Di Benedetto and De La Roche, 1998)	56
Figura 2.16 –	Fendilhamento tipo “pele de crocodilo” num pavimento	58
Figura 2.17 –	Deformações permanentes tipo rodeira num pavimento	63

Figura 3.1 – Retracção da interface entre o betume e o agregado na presença de água (Asphalt Institute, 1981)	93
Figura 3.2 – Formação de bolhas e covas numa mistura betuminosa devido à presença de água (Whiteoak, 1990)	93
Figura 3.3 – Diagrama duma gota de betume aplicada a uma superfície sólida debaixo de água (Whiteoak, 1990)	96
Figura 3.4 – Efeito da absorção de água e da adição de cal hidráulica na estabilidade de Marshall conservada após condicionamento (adaptado de Whiteoak, 1990)	99
Figura 3.5 – Funcionalidades químicas nas moléculas de betume, normalmente presentes ou formadas durante o envelhecimento oxidativo (Scholz, 1995)	104
Figura 3.6 – Alteração hiperbólica da viscosidade (envelhecimento) em vários betumes durante o tempo de serviço no pavimento (Scholz, 1995)	107
Figura 3.7 – Efeito do envelhecimento na temperatura de fractura do betume (Scholz, 1995)	109
Figura 3.8 – Procedimentos do ensaio de envelhecimento TFOT	114
Figura 3.9 – Procedimentos do ensaio de envelhecimento RTFOT	115
Figura 3.10 – Procedimentos do ensaio de envelhecimento TFO-PAV	117
Figura 3.11 – Procedimentos dos ensaios de envelhecimento desenvolvidos por Von Quintus et al. (1991) para o sistema de análise de misturas betuminosas	119
Figura 3.12 – Ensaio de envelhecimento de misturas betuminosas a curto (STOA) e a longo prazo (LTOA ou LPO), desenvolvidos por Bell et al. (1994 _a)	121
Figura 3.13 – Procedimentos do ensaio de imersão estática (ASTM D1664; 37)	129
Figura 3.14 – Equipamento utilizado no ensaio de gelo-degelo em pedestal	130
Figura 3.15 – Procedimentos do ensaio de compressão com imersão (ASTM D1075; 37)	131
Figura 3.16 – Procedimentos da versão da <i>Shell</i> do ensaio de Marshall com condicionamento	132
Figura 3.17 – Procedimentos do método de Lottman para avaliação da sensibilidade à água	133
Figura 3.18 – Equipamento utilizado para realização do ensaio ECS (Harrigan et al., 1994)	135
Figura 3.19 – Equipamento para aplicação dos aditivos nos agregados (Curtis et al., 1993)	141

Figura 4.1 – Representação no diagrama BTCD dos betumes utilizados (35/50 e 50/70)	148
Figura 4.2 – Curva granulométrica da mistura betuminosa de desgaste (0/14)	150
Figura 4.3 – Curva granulométrica da mistura betuminosa de regularização (0/19)	151
Figura 4.4 – Fracções em que foram divididas as misturas betuminosas	154
Figura 4.5 – Mufla para incineração do betume das misturas betuminosas	154
Figura 4.6 – Agregados da fracção 1 da mistura betuminosa de desgaste 7 após a incineração do betume	155
Figura 4.7 – Granulometria das diversas fracções da mistura betuminosa de desgaste 7	155
Figura 4.8 – Granulometria das misturas betuminosas de desgaste e das fracções em que estas foram divididas	156
Figura 4.9 – Granulometria das misturas betuminosas de regularização e das fracções em que estas foram divididas	156
Figura 4.10 – Granulometria do mastique existente nas diversas fracções das misturas betuminosas de desgaste	158
Figura 4.11 – Granulometria do mastique existente nas diversas fracções das misturas betuminosas de regularização	159
Figura 4.12 – Granulometria do mastique das fracções 2 e granulometria inicial da mistura betuminosa de desgaste	160
Figura 4.13 – Teor em betume do mastique existente nas diversas fracções das misturas betuminosas estudadas	161
Figura 4.14 – Granulometria do mastique existente nas três fracções de misturas betuminosas com diferentes teores em betume	162
Figura 4.15 – Granulometria do mastique existente nas três fracções de misturas betuminosas de desgaste com diferentes tipos de filer	163
Figura 4.16 – Granulometria do mastique existente nas três fracções de misturas betuminosas de regularização com diferentes tipos de filer	164
Figura 4.17 – Granulometria do mastique existente nas três fracções das misturas betuminosas de desgaste e regularização com teor óptimo em betume	165
Figura 4.18 – Composição analítica e experimental do mastique existente na mistura betuminosa de desgaste	168
Figura 4.19 – Histogramas da baridade aparente para os oito mastiques estudados	171
Figura 4.20 – Configuração dos ensaios mecânicos implementados para estudar o comportamento mecânico do mastique betuminoso	173
Figura 4.21 – Lajes preparadas com mastique	174
Figura 4.22 – Provete de mastique utilizado no ensaio de corte, antes e após ensaio	176

Figura 4.23 – Provete de mastique utilizado no ensaio de tracção, antes e após ensaio	176
Figura 4.24 – Provete de mastique utilizado no ensaio de compressão, antes e após ensaio	177
Figura 4.25 – Variação da tensão de compressão do mastique 1 em função da extensão aplicada para as cinco configurações do ensaio	180
Figura 4.26 – Variação da tensão de compressão dos oito mastiques em função da extensão aplicada para a configuração de ensaio base	181
Figura 4.27 – Variação da resistência à compressão dos mastiques em função da temperatura	183
Figura 4.28 – Resistência à compressão dos mastiques em função da velocidade de aplicação das cargas	183
Figura 4.29 – Influência do condicionamento em água na resistência à compressão dos mastiques	184
Figura 4.30 – Variação da tensão de corte do mastique 1 em função da extensão aplicada para as cinco configurações do ensaio	185
Figura 4.31 – Variação da tensão de corte dos oito mastiques em função da extensão aplicada para a configuração de ensaio base	186
Figura 4.32 – Variação da resistência ao corte dos mastiques em função da temperatura	187
Figura 4.33 – Resistência ao corte dos mastiques em função da velocidade de aplicação das cargas	188
Figura 4.34 – Variação da tensão de tracção do mastique 1 em função da extensão aplicada para as cinco configurações do ensaio	189
Figura 4.35 – Variação da tensão de tracção dos oito mastiques em função da extensão aplicada para a configuração de ensaio base	190
Figura 4.36 – Variação da resistência à tracção dos mastiques em função da temperatura	192
Figura 4.37 – Resistência à tracção dos mastiques em função da velocidade de aplicação das cargas	192
Figura 4.38 – Módulo de rigidez dos oito mastiques no ensaio axial de compressão/tracção repetida a 20 °C	194
Figura 4.39 – Ângulo de fase dos oito mastiques no ensaio axial de compressão/tracção repetida a 20 °C	194
Figura 4.40 – Variação do módulo de rigidez dos diversos mastiques a 10 Hz e a 20 °C	195
Figura 4.41 – Variação do ângulo de fase dos diversos mastiques a 10 Hz e a 20 °C	196

Figura 4.42 – Leis de fadiga dos mastiques no ensaio de tracção/compressão repetida a 20 °C	197
Figura 4.43 – N_{100} para os vários mastiques betuminosos obtido no ensaio axial de tracção/compressão repetida a 20 °C	198
Figura 4.44 – Evolução das deformações permanentes de compressão dos mastiques betuminosos em função do número de ciclos de carga a 15 °C	199
Figura 4.45 – Evolução das deformações permanentes de compressão dos mastiques betuminosos em função do número de ciclos de carga a 25 °C	199
Figura 4.46 – NAEP que origina uma rodeira de 20 mm nos mastiques por deformação permanente de compressão a 15 e 25 °C	201
Figura 4.47 – Evolução das deformações permanentes de corte dos mastiques betuminosos em função do número de ciclos de carga a 15 °C	202
Figura 4.48 – Evolução das deformações permanentes de corte dos mastiques betuminosos em função do número de ciclos de carga a 25 °C	202
Figura 4.49 – NAEP que origina uma rodeira de 20 mm nos mastiques por deformação permanente de corte a 15 e 25 °C	204
Figura 4.50 – Influência da relação filer/betume na penetração de mastiques produzidos com apenas filer e betume	205
Figura 4.51 – Influência da relação filer/betume na temperatura de amolecimento de mastiques produzidos com apenas filer e betume	206
Figura 4.52 – Influência da relação filer/betume na viscosidade rotacional de mastiques produzidos com apenas filer e betume	206
Figura 5.1 – Configuração dos provetes utilizados nos ensaios para estudo do comportamento mecânico da ligação entre o mastique e os agregados	215
Figura 5.2 – Provetes para estudo do comportamento mecânico da ligação agregado-mastique	216
Figura 5.3 – Molde metálico e cilindro de rastos lisos utilizados na preparação dos provetes para estudo da ligação agregado-mastique	216
Figura 5.4 – Histogramas da baridade aparente para os provetes com agregados e mastique	219
Figura 5.5 – Configuração dos ensaios de corte e de tracção para caracterização da ligação agregado-mastique	220
Figura 5.6 – Proвете de mastique e agregados antes e após o ensaio de corte	222
Figura 5.7 – Proвете de mastique e agregados antes e após o ensaio de tracção	222

Figura 5.8 – Variação da tensão de corte da ligação agregado-mastique em função da extensão aplicada para as cinco configurações do ensaio aplicadas ao mastique 1	223
Figura 5.9 – Variação da tensão de corte da ligação entre os agregados e os oito mastiques em função da extensão aplicada para a configuração de ensaio base	223
Figura 5.10 – Zona de rotura observada nos ensaios de corte	225
Figura 5.11 – Influência do teor em betume na resistência ao corte da ligação agregado-mastique	225
Figura 5.12 – Influência da granulometria na resistência ao corte da ligação agregado-mastique	226
Figura 5.13 – Influência do tipo de filer na resistência ao corte da ligação agregado-mastique	227
Figura 5.14 – Influência do envelhecimento na resistência ao corte da ligação agregado-mastique	228
Figura 5.15 – Influência do condicionamento em água na resistência ao corte da ligação agregado-mastique	228
Figura 5.16 – Influência da temperatura na resistência ao corte da ligação agregado-mastique	229
Figura 5.17 – Influência da velocidade de aplicação de cargas na resistência ao corte da ligação agregado-mastique	230
Figura 5.18 – Variação da tensão de tracção da ligação agregado-mastique em função da extensão aplicada para as cinco configurações do ensaio aplicadas ao mastique 1	231
Figura 5.19 – Variação da tensão de tracção da ligação entre os agregados e os oito mastiques em função da extensão aplicada para a configuração de ensaio base	231
Figura 5.20 – Zona de rotura observada nos ensaios de tracção	233
Figura 5.21 – Influência do teor em betume na resistência à tracção da ligação agregado-mastique	233
Figura 5.22 – Influência da granulometria na resistência à tracção da ligação agregado-mastique	234
Figura 5.23 – Influência do tipo de filer na resistência à tracção da ligação agregado-mastique	234
Figura 5.24 – Influência do envelhecimento na resistência à tracção da ligação agregado-mastique	235
Figura 5.25 – Influência do condicionamento em água na resistência à tracção da ligação agregado-mastique	236

Figura 5.26 – Separação na ligação agregado-mastique devido à acção da água	236
Figura 5.27 – Influência da temperatura na resistência à tracção da ligação agregado-mastique	237
Figura 5.28 – Influência da velocidade de aplicação de cargas na resistência à tracção da ligação agregado-mastique	237
Figura 5.29 – Correlação entre a resistência ao corte dos mastiques e da ligação agregado-mastique	238
Figura 5.30 – Correlação entre a resistência à tracção dos mastiques e da ligação agregado-mastique	239
Figura 6.1 – Procedimento para a definição duma mistura betuminosa em função do mastique	245
Figura 6.2 – Histogramas da baridade aparente para as misturas betuminosas estudadas	248
Figura 6.3 – Provede de mistura betuminosa utilizado no ensaio de corte, antes e após ensaio	252
Figura 6.4 – Provede de mistura betuminosa utilizado no ensaio de tracção, antes e após ensaio	252
Figura 6.5 – Provede de mistura betuminosa utilizado no ensaio de compressão, antes e após ensaio	252
Figura 6.6 – Viga utilizada no ensaio flexão repetida em quatro pontos	254
Figura 6.7 – Provede utilizado no ensaio de corte repetido com altura constante	255
Figura 6.8 – Variação da tensão de compressão da mistura betuminosa 1 em função da extensão aplicada para as cinco configurações de ensaio	257
Figura 6.9 – Variação da tensão de compressão das oito misturas betuminosas em função da extensão aplicada para a configuração de ensaio “base”	258
Figura 6.10 – Influência do condicionamento em água na resistência à compressão das misturas betuminosas	261
Figura 6.11 – Variação da resistência à compressão das misturas betuminosas com a temperatura	262
Figura 6.12 – Resistência à compressão das misturas betuminosas em função da velocidade de aplicação das cargas	263
Figura 6.13 – Variação da tensão de corte da mistura betuminosa 1 em função da extensão aplicada para as cinco configurações de ensaio	264
Figura 6.14 – Variação tensão de corte das oito misturas betuminosas em função da extensão aplicada para a configuração de ensaio “base”	264

Figura 6.15 – Influência do condicionamento em água na resistência ao corte das misturas betuminosas	266
Figura 6.16 – Variação da resistência ao corte das misturas betuminosas com a temperatura	267
Figura 6.17 – Resistência ao corte das misturas betuminosas em função da velocidade de aplicação das cargas	267
Figura 6.18 – Variação da tensão tracção da mistura betuminosa 1 em função da extensão aplicada para as cinco configurações de ensaio	268
Figura 6.19 – Variação da tensão de tracção das oito misturas betuminosas em função da extensão aplicada para a configuração de ensaio “base”	269
Figura 6.20 – Influência do condicionamento em água na resistência à tracção das misturas betuminosas	270
Figura 6.21 – Variação da resistência à tracção das misturas betuminosas com a temperatura	271
Figura 6.22 – Resistência à tracção das misturas betuminosas em função da velocidade de aplicação das cargas	272
Figura 6.23 – Módulo de rigidez das misturas betuminosas no ensaio axial de compressão/tracção repetida a 20 °C	273
Figura 6.24 – Ângulo de fase das misturas betuminosas no ensaio axial de compressão/tracção repetida a 20 °C	273
Figura 6.25 – Leis de fadiga das misturas betuminosas no ensaio axial de tracção/compressão repetida a 20 °C	275
Figura 6.26 – N_{100} para as várias misturas betuminosas obtido no ensaio axial de tracção/compressão repetida a 20 °C	276
Figura 6.27 – Módulo de rigidez das misturas betuminosas no ensaio de flexão repetida em quatro pontos a 15 °C	278
Figura 6.28 – Ângulo de fase das misturas betuminosas no ensaio de flexão repetida em quatro pontos a 15 °C	278
Figura 6.29 – Variação do módulo de rigidez das misturas betuminosas com a temperatura para a frequência de 10 Hz	279
Figura 6.30 – Variação do ângulo de fase das misturas betuminosas com a temperatura para a frequência de 10 Hz	280
Figura 6.31 – Leis de fadiga das misturas betuminosas no ensaio de flexão repetida em quatro pontos a 20 °C	281
Figura 6.32 – N_{100} para as várias misturas betuminosas obtido no ensaio de flexão repetida em quatro pontos a 20 °C	282
Figura 6.33 – Módulo de corte das misturas betuminosas no ensaio de corte repetido (RSST-CH) a 15 °C	283

Figura 6.34 – Ângulo de fase das misturas betuminosas no ensaio de corte repetido (RSST-CH) a 15 °C	283
Figura 6.35 – Variação do módulo de corte das misturas betuminosas com a temperatura para a frequência de 10 Hz	285
Figura 6.36 – Variação do ângulo de fase das misturas betuminosas com a temperatura para a frequência de 10 Hz	285
Figura 6.37 – Evolução da deformação permanente de corte das misturas betuminosas em função do número de ciclos de carga a 50 °C	286
Figura 6.38 – NAEP que origina uma rodeira de 20 mm nas misturas betuminosas a 50 °C	287
Figura 6.39 – Correlação entre a resistência à compressão das misturas betuminosas e dos mastiques	289
Figura 6.40 – Correlação entre a resistência ao corte das misturas betuminosas e dos mastiques	289
Figura 6.41 – Correlação entre a resistência à tracção das misturas betuminosas e dos mastiques	290
Figura 6.42 – Correlação entre o módulo de rigidez das misturas betuminosas e dos mastiques	291
Figura 6.43 – Correlação entre o ângulo de fase das misturas betuminosas e dos mastiques	291
Figura 6.44 – Correlação entre o NAEP estimado em ensaios de deformação permanente para as misturas betuminosas e para os mastiques	292
Figura 6.45 – Correlação entre a vida à fadiga das misturas betuminosas para uma extensão de 100E-6 e a vida à fadiga dos mastiques	293
Figura 6.46 – Correlação entre a acção da água nas misturas betuminosas e nos mastiques	294
Figura 6.47 – Correlação entre a resistência ao corte e o módulo de corte das misturas betuminosas	296
Figura 6.48 – Correlação entre a resistência à tracção e o módulo de rigidez das misturas betuminosas	297
Figura 6.49 – Correlação entre a resistência à compressão e ao corte das misturas betuminosas e o NAEP estimado no ensaio RSST-CH	298
Figura 6.50 – Correlação entre a vida à fadiga das misturas betuminosas no ensaio axial repetido e no ensaio de flexão repetida em quatro pontos	298
Figura 6.51 – Correlação entre o módulo de rigidez no ensaio axial de tracção/compressão repetida e nos ensaios de flexão repetida em 4 pontos e de corte repetido (RSST-CH)	299

Figura 6.52 – Correlação entre o ângulo de fase no ensaio axial de tração/compressão repetida e nos ensaios de flexão repetida em 4 pontos e de corte repetido (RSST-CH)	300
Figura 7.1 – Estrutura heterogénea e multifase das misturas betuminosas (Sadd et al., 2003)	311
Figura 7.2 – Conceitos para modelação das misturas betuminosas (Sadd et al., 2003)	312
Figura 7.3 – Proverte para verificação com ensaio de tração indirecta e modelo numérico correspondente (Sadd et al., 2003)	313
Figura 7.4 – Modelo de elementos finitos usado no programa ABAQUS (Sadd et al., 2003)	313
Figura 7.5 – Geração aleatória da malha de elementos de treliça (Guddati et al., 2002)	315
Figura 7.6 – Modelo de elementos de treliça para elementos heterogéneos (Guddati et al., 2002)	316
Figura 7.7 – Previsão do fendilhamento com o modelo de elementos de treliça num ensaio de tração indirecta (Guddati et al., 2002)	317
Figura 7.8 – Esquema do comportamento dos materiais em fractura na zona de ponta da fenda (Song et al., 2005)	318
Figura 7.9 – Comparação entre os resultados numéricos e experimentais no ensaio de tração “compacta” em provete cilíndrico (Song et al., 2005)	319
Figura 7.10 – Ensaio de flexão em três pontos com fenda induzida e malha utilizada para simular o provete de ensaio (Song et al., 2005)	319
Figura 7.11 – Semelhança do fendilhamento previsto e experimental (Song et al., 2005)	319
Figura 7.12 – Modelo de elementos finitos desenvolvido por Kim et al. (2005)	321
Figura 7.13 – Deformação da mistura betuminosa e estado de tensão instalado no 2º e no 15º ciclos de carga (Kim et al., 2005)	322
Figura 7.14 – Esquema dos modelos de contacto (You and Buttlar, 2005)	324
Figura 7.15 – Proverte sintético ensaiado à tração indirecta (Buttlar and You, 2001)	324
Figura 7.16 – Fendilhamento previsto para uma mistura betuminosa após um ensaio de tração indirecta (Buttlar and You, 2001)	325
Figura 7.17 – Provetes utilizados no ensaio de tração com cilindro oco e modelo de elementos discretos correspondente (You and Buttlar, 2005)	325
Figura 7.18 – Comparação dos resultados obtidos em laboratório com os resultados previstos com o modelo de elementos discretos (You and Buttlar, 2005)	326

Figura 7.19 – Modelos de simulação do ensaio monotónico de compressão sobre o mastique	328
Figura 7.20 – Modelos de simulação do ensaio monotónico de corte sobre o mastique	328
Figura 7.21 – Modelos de simulação do ensaio monotónico de tracção sobre o mastique	329
Figura 7.22 – Variação não linear da resistência à tracção dos mastiques em função da deformação aplicada ao provete	329
Figura 7.23 – Padrão de fendilhamento previsto para o mastique 1 no ensaio de tracção efectuado a uma velocidade elevada	330
Figura 7.24 – Padrão de fendilhamento previsto para o mastique 1 no ensaio de tracção efectuado a uma velocidade moderada	331
Figura 7.25 – Tensões e extensões principais de compressão previstas para o mastique 1	331
Figura 7.26 – Tensões e extensões principais de corte previstas para o mastique 1	332
Figura 7.27 – Previsão do comportamento do mastique 1 no ensaio de tracção efectuado a uma velocidade moderada com o modelo microestrutural de treliça	333
Figura 7.28 – Modelo de simulação do ensaio monotónico de compressão sobre as misturas betuminosas	334
Figura 7.29 – Modelo de simulação do ensaio monotónico de corte sobre as misturas betuminosas	334
Figura 7.30 – Modelo de simulação do ensaio monotónico de tracção sobre as misturas betuminosas	335
Figura 7.31 – Variação não linear da resistência à tracção das misturas betuminosas de desgaste em função da deformação aplicada aos provetes	336
Figura 7.32 – Padrão de fendilhamento previsto para a mistura betuminosa 1 no ensaio de tracção efectuado a uma velocidade elevada	337
Figura 7.33 – Padrão de fendilhamento previsto para a mistura betuminosa 1 no ensaio de tracção efectuado a uma velocidade moderada	337
Figura 7.34 – Tensões principais de compressão e padrão de fendilhamento previstos para a mistura betuminosa de desgaste 1	338
Figura 7.35 – Tensões principais de corte e padrão de fendilhamento previstos para a mistura betuminosa de desgaste 1	339
Figura 7.36 – Modelo utilizado para previsão do comportamento dum mistura betuminosa de regularização no ensaio monotónico de tracção	340
Figura 7.37 – Modelo utilizado para previsão do comportamento dum macadame betuminoso de base no ensaio monotónico de tracção	341

Figura 7.38 – Previsão da variação não linear da resistência à tracção numa mistura betuminosa de regularização em função da deformação	341
Figura 7.39 – Padrão de fendilhamento previsto para uma mistura betuminosa de regularização no ensaio de tracção a uma velocidade moderada	342
Figura 7.40 – Previsão da variação não linear da resistência à tracção dum macadame betuminoso de base em função da deformação	342
Figura 7.41 – Padrão de fendilhamento previsto para um macadame betuminoso de base no ensaio de tracção a uma velocidade moderada	343

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 – Famílias e tipos de degradações (Pereira e Miranda, 1999)	14
Quadro 2.2 – Variáveis que afectam as propriedades das misturas betuminosas	34
Quadro 2.3 – Categorias de métodos de formulação e respectivos critérios (adaptado de Luminari and Fidato, 1998)	36
Quadro 2.4 – Métodos de formulação e respectivas categorias (adaptado de Luminari and Fidato, 1998)	40
Quadro 2.5 – Vantagens e desvantagens da cada categoria de métodos de formulação	49
Quadro 2.6 – Efeito da variação de alguns factores no comportamento à fadiga de misturas betuminosas (Tayebali et al., 1993)	65
Quadro 2.7 – Efeito da variação de alguns factores no comportamento às deformações permanentes (Tayebali et al., 1993)	66
Quadro 3.1 – Propriedades dos materiais e influências externas que afectam a ligação agregado-mastique (Whiteoak, 1990)	100
Quadro 3.2 – Efeitos que podem alterar as propriedades de ligação do betume (Traxler, 1963)	102
Quadro 3.3 – Grupos químicos funcionais formados no betume durante o envelhecimento oxidativo (Scholz, 1995)	104
Quadro 3.4 – Grupos químicos funcionais formados nas fracções do betume durante o envelhecimento oxidativo (Scholz, 1995)	105
Quadro 3.5 – Ensaios de simulação do envelhecimento do betume	124
Quadro 3.6 – Resumo dos procedimentos do ensaio ECS (Scholz, 1995)	136
Quadro 3.7 – Ensaios de simulação da sensibilidade à água das misturas betuminosas	136
Quadro 4.1 – Características dos betumes utilizados	147
Quadro 4.2 – Curva granulométrica da mistura betuminosa de desgaste (0/14)	150
Quadro 4.3 – Curva granulométrica da mistura betuminosa de regularização (0/19)	150
Quadro 4.4 – Misturas betuminosas produzidas para estudo da composição do mastique	153
Quadro 4.5 – Teores em betume obtidos durante o estudo da composição do mastique	157

Quadro 4.6 – Composição média do mastique existente nas várias fracções das misturas betuminosas de desgaste	159
Quadro 4.7 – Composição média do mastique existente nas várias fracções das misturas betuminosas de regularização	159
Quadro 4.8 – Teores em betume do mastique obtidos analítica e experimentalmente	165
Quadro 4.9 – Composição analítica e experimental do mastique existente na mistura betuminosa de desgaste	167
Quadro 4.10 – Composição dos mastiques betuminosos	170
Quadro 4.11 – Valores estatísticos da baridade aparente dos mastiques betuminosos	172
Quadro 4.12 – Resistência do mastique obtida nos ensaios monotónicos de compressão	182
Quadro 4.13 – Resistência do mastique obtida nos ensaios monotónicos de corte.....	187
Quadro 4.14 – Resistência dos mastiques obtida nos ensaios monotónicos de tracção	191
Quadro 4.15 – Módulo de rigidez e ângulo de fase do mastique a 20 °C à frequência de 10 Hz	195
Quadro 4.16 – Parâmetros das leis de fadiga $N = a \times (1/\varepsilon_r)^b$ dos mastiques no ensaio axial de tracção/compressão repetida a 20 °C	197
Quadro 4.17 – NAEP que origina uma rodeira de 20 mm nos mastiques obtido no ensaio de compressão repetida	200
Quadro 4.18 – NAEP que origina uma rodeira de 20 mm nos mastiques obtido no ensaio de corte repetido	203
Quadro 5.1 – Composição dos mastiques betuminosos e variáveis em estudo	217
Quadro 5.2 – Parâmetros estatísticos para a baridade aparente dos provetes com agregados e mastique	219
Quadro 5.3 – Resistência da ligação agregado-mastique obtida nos ensaios monotónicos de corte	224
Quadro 5.4 – Resistência da ligação agregado-mastique obtida nos ensaios monotónicos de tracção	232
Quadro 6.1 – Teor em betume das misturas betuminosas e dos mastiques respectivos	246
Quadro 6.2 – Composição das misturas betuminosas	246
Quadro 6.3 – Parâmetros estatísticos para a baridade aparente das misturas betuminosas	249

Quadro 6.4 –	Parâmetros estatísticos para a porosidade das misturas betuminosas	249
Quadro 6.5 –	Resistência das misturas betuminosas nos ensaios monotônicos de compressão	258
Quadro 6.6 –	Resistência das misturas betuminosas nos ensaios monotônicos de corte	265
Quadro 6.7 –	Resistência das misturas betuminosas nos ensaios monotônicos de tracção	269
Quadro 6.8 –	Módulo de rigidez e ângulo de fase das misturas betuminosas obtidos no ensaio axial repetido a 20 °C e a 10 Hz	274
Quadro 6.9 –	Parâmetros das leis de fadiga $N = a \times (1/\varepsilon_i)^b$ das misturas betuminosas no ensaio axial de tracção/compressão repetida a 20 °C	275
Quadro 6.10 –	Módulo de rigidez e ângulo de fase das misturas betuminosas no ensaio de flexão repetida em quatro pontos à frequência de 10 Hz	279
Quadro 6.11 –	Parâmetros das leis de fadiga $N = a \times (1/\varepsilon_i)^b$ das misturas betuminosas no ensaio de flexão repetida em quatro pontos a 20 °C	281
Quadro 6.12 –	Módulo de rigidez e ângulo de fase das misturas betuminosas no ensaio de corte repetido (RSST-CH) a uma frequência de 10 Hz	284
Quadro 6.13 –	NAEP que origina uma rodeira de 20 mm nas misturas betuminosas obtido no ensaio de corte repetido RSST-CH	286

GLOSSÁRIO DE SÍMBOLOS E DE ABREVIATURAS

ε	– Nível de extensão
σ	– Nível de tensão
α	– Variável utilizada para o cálculo do teor óptimo em betume
γ_a	– Baridade aparente dos agregados
a	– Raio de actuação da carga, proporção ponderal de elementos passados no peneiro #3/8”, coeficiente determinado experimentalmente
A	– Declive da recta que representa, em escala semi-logarítmica, a viscosidade do betume em função da temperatura
AASHTO	– <i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i> (E.U.A.)
AFNOR	– Especificações francesas
APORBET	– Associação portuguesa de fabricantes de misturas betuminosas
ASA	– Aditivos “anti-descolagem” (<i>Anti-Stripping Agents</i>)
ASTM	– <i>American Society for Testing and Materials</i> (E.U.A.)
ASTO	– Programa de estudo de pavimentos betuminosos (Finlândia)
b	– Proporção ponderal de elementos passados no peneiro #4, coeficiente determinado experimentalmente
BBD	– Betão betuminoso de desgaste
BBR	– Mistura betuminosa densa de regularização
BS	– <i>British Standards</i> (especificações do Reino Unido)
BTCD	– Diagrama dos resultados dos ensaios ao betume (<i>Bitumen Test Data Chart</i>)
c	– Proporção ponderal de elementos passados no peneiro #10, coeficiente determinado experimentalmente
C	– Símbolo químico do carbono
CNR	– Comité nacional de investigação (Itália)
CROW	– Centro de normalização e pesquisa em Engenharia Civil e Rodoviária (Países Baixos)
CRR	– <i>Centre de Recherches Routière</i> (Bélgica)
d	– Proporção ponderal de elementos passados no peneiro #80, coeficiente determinado experimentalmente
DIN	– Especificações alemãs
e	– Proporção ponderal de elementos passados no peneiro #200

E	– Módulo de rigidez
E_{∞}	– Módulo puramente elástico
E^*	– Módulo complexo
$ E^* $	– Valor absoluto do módulo complexo, também denominado de módulo de rigidez
E1	– Parte real do módulo complexo
E2	– Parte imaginária do módulo complexo
ECS	– Sistema de condicionamento ambiental (<i>Environmental Conditioning System</i>)
f	– Proporção ponderal de elementos inferiores a 0,075 mm, volume de filler
F	– Força ou carga
FTPT	– Ensaio de gelo-degelo em pedestal (<i>Freeze-Thaw Pedestal Test</i>)
G	– Proporção ponderal de elementos superiores a 6,3 mm
G^*	– Módulo de corte complexo
GEL	– Estrutura de betume tipo gelatinosa
H	– Símbolo químico do hidrogénio
Hg	– Símbolo químico do mercúrio
HMA	– Mistura betuminosa a quente (<i>Hot Mix Asphalt</i>)
IDT	– Ensaio de durabilidade (<i>Iowa Durability Test</i>)
IP	– Índice de penetração
IRS	– Índice de resistência conservada (<i>Index of Retained Strength</i>)
IWTT	– Ensaio de <i>Whell-Tracking</i> com imersão (<i>Immersion Wheel-Tracking Test</i>)
JAE	– Junta Autónoma de Estradas (Portugal)
K	– Módulo de riqueza em betume
LCPC	– <i>Laboratoire Central des Ponts et Chaussées</i> (França)
LPO	– Oxidação de baixa pressão (<i>Low-Pressure Oxidation</i>)
LTOA	– Envelhecimento forçado e acelerado a longo prazo numa estufa (<i>Long-Term Oven Aging</i>)
N	– Símbolo químico do nitrogénio, número de aplicações de carga até à rotura
NAEP	– Número acumulado de eixos padrão
NARC	– <i>National Asphalt Research Committee</i> (Austrália)
N_f	– Número de aplicações de carga até à rotura
N_i	– Número de aplicações de tensão σ_i , ou de extensão ϵ_i , até à rotura
n_i	– Número de aplicações de tensão σ_i ou extensão ϵ_i

NP	– Norma Portuguesa
O	– Símbolo químico do oxigénio
P	– Carga do rodado
PAV	– Ensaio de envelhecimento do betume num recipiente pressurizado (<i>Pressure Aging Vessel</i>)
P _b	– Teor em betume (percentagem do peso de betume sobre o peso total dos agregados)
pen _{Ti}	– Penetração do betume para a temperatura de ensaio i
P _{envelhecido}	– Propriedade física do betume, medida depois do betume ser envelhecido de algum modo (por exemplo, <i>Thin Film Oven Test</i> ou envelhecimento <i>in situ</i>)
PG	– Grau de comportamento (<i>Performance Grade</i>)
pH	– Potencial de Hidrogénio (mede a acidez de um líquido)
P _{não envelhecido}	– Propriedade física medida no betume não envelhecido (por exemplo, penetração, viscosidade ou ponto de amolecimento)
q	– Pressão
R	– Cadeias alifáticas, nafténicas ou carbono-aromáticas, coeficiente de correlação
RILEM	– <i>Réunion Internationale des Laboratoires d'Essais et de Recherches sur les Matériaux et les Constructions</i>
RMFOT	– Ensaio de envelhecimento rotativo numa película extrafina de betume numa estufa (<i>Rolling Microfilm Oven Test</i>)
RSST-CH	– Ensaio de corte simples repetido a altura constante (<i>Repetitive Simple Shear Test at Constant Height</i>)
RTFOT	– Ensaio de envelhecimento rotativo numa película fina de betume numa estufa (<i>Rolling Thin Film Oven Test</i>)
s	– Proporção ponderal de elementos compreendidos entre 0,075 e 0,315 mm
S	– Símbolo químico do enxofre, proporção ponderal de elementos compreendidos entre 0,315 e 6,300 mm
S _{mix}	– Rigidez numa mistura betuminosa
SBR	– Borracha de estireno-butadieno
SHRP	– <i>Strategic Highway Research Program</i> (E.U.A.)
SN	– <i>Schweizer Norm</i> (norma suíça)
SOL	– Estrutura de betume tipo solução
STOA	– Envelhecimento forçado e acelerado a curto prazo numa estufa (<i>Short-Term Oven Aging</i>)
T	– Temperatura de ensaio

t	– Tempo de carregamento
t_b	– Teor em betume
TFAAT	– Ensaio de envelhecimento acelerado numa película fina de betume numa estufa (<i>Thin Film Accelerated Ageing Test</i>)
TFOT	– Ensaio de envelhecimento numa película fina de betume numa estufa (<i>Thin Film Oven Test</i>)
UV	– Radiação ultravioleta
w	– Entrada de água para as camadas granulares e solo de fundação, frequência angular (rad/s)
W	– Trabalho para deslocar a água de uma área unitária de sólido
ΔT	– Variação de temperatura
τ_t	– Tensão tangencial na superfície do pavimento
ν	– Coeficiente de Poisson
φ	– Ângulo de fase
Σ	– Superfície específica total dos agregados
ε, σ	– Extensão e tensão de tracção
ε_t	– Extensão de tracção aplicada
γ_{bw}	– Energias das interfaces betume/água
γ_{sb}	– Energias das interfaces sólido/betume
γ_{sw}	– Energias das interfaces sólido/água
θ	– Ângulo de contacto entre três fases (sólido/betume/água)
σ_t	– Tensão de compressão e de tracção no plano horizontal
σ_z	– Tensão de compressão no plano vertical