



DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

Misturas Betuminosas Recicladas a Quente em Central

Contribuição para o seu estudo e aplicação

António Miguel Costa Baptista



DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

Misturas Betuminosas Recicladas a Quente em Central

Contribuição para o seu estudo e aplicação

Autor

António Miguel Costa Baptista
MSc, Professor Adjunto do DEC da ESTV

Orientador

Luís de Picado Santos
PhD, Professor Associado com Agregação do DEC da FCTUC

Dissertação submetida à Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, como requisito para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil, Especialidade de Urbanismo, Ordenamento do Território e Transportes

Coimbra, Dezembro de 2006

Trabalho desenvolvido com o apoio do Programa para o Desenvolvimento Educativo em Portugal (PRODEP III), Medida 5 - Acção 5.3 - Formação Avançada de Docentes do Ensino Superior



RESUMO

Em Portugal, registou-se ao longo dos últimos vinte anos um forte investimento na construção rodoviária. Estando concluída grande parte da rede rodoviária nacional planeada, tem-se vindo a observar um natural abrandamento na construção de novas estradas e um aumento das despesas de conservação e reabilitação das estradas em serviço.

A selecção do processo de reabilitação mais adequado deverá basear-se em critérios de ordem técnica, económica e ambiental. No que respeita à reabilitação de pavimentos rodoviários flexíveis, além das soluções tradicionais, existem outras técnicas de reciclagem do material proveniente das camadas betuminosas degradadas. A reciclagem a quente em central é uma das alternativas a que é apontado um maior potencial de crescimento em Portugal nos próximos anos.

A reciclagem a quente em central, muito usada noutros países, além das evidentes vantagens de ordem ambiental, é, na maioria das situações, tecnicamente viável e economicamente vantajosa. Todavia, em Portugal identificam-se ainda poucas obras com recurso a esta técnica. Surge assim a necessidade da presente investigação, cujo objectivo principal era contribuir para o estudo e aplicação da reciclagem a quente em central, de modo a promover a sua implementação em Portugal.

Na dissertação descrevem-se as principais técnicas de reciclagem de misturas betuminosas, sendo dado destaque à técnica estudada. No âmbito da formulação das misturas recicladas a quente, definem-se as características mecânicas fundamentais das misturas e descrevem-se os ensaios de caracterização mecânica e os principais métodos de formulação.

Nos trabalhos experimentais estudaram-se misturas recicladas produzidas em laboratório e aplicadas em trechos experimentais. Os resultados dos ensaios de caracterização mecânica das misturas permitiram confirmar o bom desempenho das misturas recicladas a quente quando comparado com o das misturas sem incorporação de material fresado.

Finalmente, propõem-se algumas recomendações a considerar na técnica de reciclagem a quente em central e apresenta-se um breve estudo económico que demonstra as suas vantagens em termos de custos.

ABSTRACT

For the last twenty years a huge amount of road construction took place in Portugal. At the present time the most part of the National Road Plan is concluded and as consequence the network maintenance and rehabilitation is the present and future main concern for the administration.

The decision about the appropriated rehabilitation solution should follow adequate criteria in terms of environment, technology and economical efficiency. For road maintenance purpose it is possible the use of reclaimed materials from the flexible pavement to rehabilitate. Hot mix recycled asphalt concrete in plant is one of the possible technical solutions that use the reclaimed material and is the one with more potential to be used in the years to come by the Portuguese industry in the rehabilitation of flexible pavements.

As could be learned from several foreign experiences, hot mix recycled asphalt concrete in plant is a good solution for the most part of the flexible pavement rehabilitation solutions, in terms of simplicity of the technology needed, in terms of economical efficiency and, of course, in terms of environment protection. Nevertheless, the Portuguese industry didn't use it very much for the last years. This fact underlines the importance of the present work, which main goal was the constitution of a tested state-of-art about that technique to support and promote its use in Portugal.

In this work, besides the referred technique, all other main alternatives were described. In the part related with composition study of the hot mix recycled asphalt concrete in plant, definition of its main mechanical characteristics was made, as well the description of main mechanical characterization tests and the main methodologies to establish the composition of the material.

In the experimental part of the work the behaviour of the material was analysed in laboratory and using trial sections. The study could confirm the excellent mechanical behaviour of the material when compared with other bituminous mixtures without reclaimed material.

This thesis was finished with an analysis of the economical benefits of the use of hot mix recycled asphalt concrete in plant and the deliver of some production and lay down guidelines.

AGRADECIMENTOS

Ao apresentar este trabalho desejo expressar publicamente os meus agradecimentos a todas as pessoas e entidades que me apoiaram na sua realização.

Manifesto de forma especial a minha profunda gratidão ao Professor Doutor Luís Picado Santos, Professor Associado do Departamento de Engenharia Civil (DEC) da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra (FCTUC), pela orientação científica deste trabalho, pelos seus ensinamentos, pela sua dedicação e perseverança, pelos meios financeiros, técnicos e humanos colocados à disposição, pela sua constante disponibilidade, pelos elementos fornecidos e pela leitura atenta e crítica do texto original. Ao Professor Picado Santos, que também foi meu orientador da dissertação de Mestrado, devo em grande parte a minha formação na área dos pavimentos rodoviários e na qual tenho desenvolvido a minha actividade como docente e investigador.

Expresso igualmente o meu agradecimento à Escola Superior de Tecnologia de Viseu (ESTV), nas pessoas do actual Presidente do Conselho Directivo, Dr. José Alberto Ferreira, do anterior Presidente do Conselho Directivo, Engenheiro Fernando Sebastião, e do Director do Departamento de Engenharia Civil (DEC), Engenheiro Manuel Pinto, por todo o apoio prestado à investigação.

Agradeço também a todos os colegas do DEC-ESTV, pelo incentivo, pela camaradagem e por, ao longo do período da investigação, terem exercido algumas das minhas funções de modo a que eu pudesse ter mais disponibilidade para realizar os trabalhos.

Gostaria igualmente de agradecer à concessionária LUSOS CUT/AENOR, especialmente ao Engenheiro Luís Trabulo, e à Rosas Construtores, SA, pelo empenho e apoio na execução dos trechos experimentais e pelos materiais e elementos fornecidos.

Dirijo também o meu agradecimento ao Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, instituição onde tive a honra de iniciar o meu percurso académico, na pessoa do Responsável do Laboratório de Pavimentos Rodoviários, Professor Doutor Silvino Capitão, pela

disponibilização do laboratório, onde, fruto da parceria com o DEC-FCTUC, foram produzidos e compactados provetes usados nos trabalhos experimentais.

Deixo também uma nota de agradecimento ao Professor Doutor Francisco Freitas e ao Engenheiro Miguel Silva, do Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial, pela disponibilidade demonstrada no acerto da máquina de cargas repetidas instalada no Laboratório de Mecânica de Pavimentos do DEC-FCTUC.

Agradeço igualmente a todos os membros do Grupo de Investigação em Vias de Comunicação (GIV), em especial ao Professor Doutor Silvino Capitão, à Professora Doutora Rosa Luzia, ao Professor Doutor Adelino Ferreira, ao Engenheiro Dinis Gardete e à Engenheira Arminda Almeida, e ainda ao Engenheiro Fernando Martinho, ao Dr. José Feiteira e ao Senhor José Garcez, pela entajuda, pela troca de impressões, pelo incentivo e pela camaradagem.

Agradeço também ao Senhor Celestino Marques, técnico do Laboratório de Mecânica de Pavimentos do DEC-FCTUC, pela preciosa colaboração na realização de grande parte dos trabalhos experimentais.

É devido ainda um agradecimento ao Engenheiro Marco Filipe e ao Senhor Marco Vinhanova, funcionários do DEC-ESTV, pela ajuda em alguns trabalhos experimentais.

Deixo ainda um agradecimento especial ao meu irmão Mário, por toda a ajuda que me deu ao longo destes três anos.

Para terminar, agradeço especialmente à minha família, em particular à Mimi, minha mulher, por tantas vezes me ter substituído em tarefas importantes e sempre ter estado ao meu lado ao longo desta caminhada, e ao meu filho André, por ter compreendido as minhas ausências.

António Miguel Costa Baptista

Coimbra, Dezembro de 2006

ÍNDICE

1 INTRODUÇÃO

1.1	Enquadramento.....	1
1.2	Objectivos e Metodologia.....	5
1.3	Organização do Trabalho.....	6
1.4	Referências Bibliográficas.....	7

2 TÉCNICAS DE RECICLAGEM DE MISTURAS BETUMINOSAS

2.1	Considerações Iniciais.....	9
2.2	Técnicas de Reciclagem.....	10
2.3	Breve Descrição das Técnicas de Reciclagem In Situ.....	11
2.3.1	Reciclagem a frio <i>in situ</i> com cimento.....	11
2.3.2	Reciclagem a frio <i>in situ</i> com emulsão betuminosa.....	12
2.3.3	Reciclagem a frio <i>in situ</i> com betume-espuma.....	13
2.3.4	Reciclagem a quente <i>in situ</i>	14
2.4	Breve Descrição das Técnicas de Reciclagem em Central.....	15
2.4.1	Reciclagem a frio em central com emulsão betuminosa.....	15
2.4.2	Reciclagem a frio em central com betume-espuma.....	15
2.4.3	Reciclagem semi-quente em central.....	16
2.4.4	Reciclagem a quente em central.....	17
2.5	A Técnica de Reciclagem a Quente em Central.....	18
2.5.1	Nota introdutória.....	18
2.5.2	Conceitos de base.....	18
	- Materiais constituintes.....	18
	- Taxas de reciclagem.....	19
2.5.3	Dados sobre reciclagem a quente em central.....	20
2.5.4	Processos de fabrico das misturas recicladas a quente.....	20
	- Fabrico em centrais descontínuas.....	22
	- Fabrico em centrais contínuas.....	24
2.5.5	Equilíbrio térmico no fabrico das misturas.....	27
	- Noções relativas a equilíbrio térmico.....	27
	- Aplicação às misturas betuminosas recicladas a quente.....	30
	- Exemplos de aplicação.....	33
2.6	Considerações Finais.....	35
2.7	Referências Bibliográficas.....	35

3 FORMULAÇÃO DE MISTURAS BETUMINOSAS RECICLADAS A QUENTE

3.1	Considerações Iniciais	39
3.2	Composição das Misturas	40
3.2.1	Misturas betuminosas a quente.....	40
3.2.2	Misturas betuminosas recicladas a quente.....	42
3.3	Características Gerais dos Materiais Elementares e das Misturas	45
3.3.1	Nota introdutória	45
3.3.2	Agregados.....	46
3.3.3	Betume asfáltico	46
3.3.4	Material fresado.....	50
3.3.5	Misturas betuminosas compactadas.....	51
3.4	Características Mecânicas das Misturas Betuminosas	52
3.4.1	Nota introdutória	52
3.4.2	Características de deformabilidade.....	52
3.4.3	Comportamento à fadiga e à deformação permanente.....	55
3.4.4	Factores que influenciam as características mecânicas das misturas.....	58
3.5	Ensaio de Caracterização Mecânica das Misturas Betuminosas	59
3.5.1	Nota introdutória	59
3.5.2	Ensaio de avaliação das características de deformabilidade e da resistência à fadiga	59
3.5.3	Ensaio de avaliação da resistência à deformação permanente	66
3.6	Métodos de Formulação de Misturas Betuminosas a Quente	68
3.6.1	Nota introdutória	68
3.6.2	Breve referência aos métodos de formulação existentes	68
3.6.3	Método de formulação adaptável às condições tecnológicas portuguesas.....	73
3.7	Métodos de Formulação de Misturas Betuminosas Recicladas a Quente	77
3.7.1	Nota introdutória	77
3.7.2	Metodologia geral de formulação.....	77
3.7.3	Métodos desenvolvidos nos EUA.....	81
	- Método do <i>Asphalt Institute</i>	81
	- Método <i>Superpave</i>	84
3.7.4	Método Australiano	88
3.7.5	Método Espanhol.....	89
3.7.6	Método de formulação adoptado	90
3.7.7	Exemplo de formulação.....	92
	- Caracterização do material fresado	92
	- Granulometria dos agregados novos	93
	- Composição granulométrica.....	93
	- Estimativa da percentagem de betume	95
	- Selecção do betume novo.....	95
	- Estabelecimento da percentagem de betume a usar.....	96
3.8	Considerações Finais	98
3.9	Referências Bibliográficas	99

4 TRABALHOS EXPERIMENTAIS

4.1	Considerações Iniciais	105
4.2	Tipos de Misturas Consideradas no Estudo	105
4.3	Estabelecimento da Composição de Base das Misturas	106
4.3.1	Macadame betuminoso aplicado nos trechos experimentais (MBTE)	106
	- Caracterização do material fresado	106
	- Caracterização dos materiais novos	109
	- Composição granulométrica	110
	- Percentagem de betume a usar	112
	- Designação das misturas a estudar	114
4.3.2	Macadame betuminoso produzido e compactado em laboratório (MLB).....	115
4.3.3	Betão betuminoso produzido e compactado em laboratório (BDLB)	116
	- Caracterização do material fresado	116
	- Caracterização dos materiais novos	117
	- Composição granulométrica	118
	- Estimativa da percentagem de betume	121
	- Percentagem de betume a usar	121
	- Designação das misturas a estudar	126
4.4	Execução dos Trechos Experimentais	126
4.4.1	Nota introdutória	126
4.4.2	Adaptação das fórmulas de trabalho.....	126
	- Alimentação do tambor secador.....	126
	- Unidade de mistura	127
4.4.3	Esquema dos trechos experimentais.....	128
4.4.4	Descrição da central usada no fabrico das misturas	129
4.4.5	Considerações sobre o processo de fabrico	130
4.4.6	Desempenho da central	131
4.4.7	Aplicação das misturas	133
4.4.8	Espessura das camadas	136
4.5	Produção e Compactação das Misturas em Laboratório.....	136
4.6	Preparação e Obtenção dos Provetes para os Ensaios de Desempenho	138
4.6.1	Provetes das misturas MBTE	138
4.6.2	Provetes das misturas MLB	141
4.6.3	Provetes das misturas BDLB.....	141
4.6.4	Designação dos provetes	143
4.7	Características Gerais das Misturas	143
4.7.1	Nota introdutória	143
4.7.2	Características das misturas MBTE.....	143
	- Composição das misturas.....	143
	- Provetes <i>Marshall</i> provenientes dos trechos experimentais.....	144
	- Provetes <i>Marshall</i> moldados em laboratório	145
	- Baridade das misturas compactadas (provetes <i>Marshall</i>)	146
	- Ensaio de compressão <i>Marshall</i>	146
	- Baridade máxima teórica	146
	- Apreciação dos valores relativos aos provetes <i>Marshall</i>	147

- Provetes usados nos ensaios de desempenho	148
4.7.3 Características das misturas MBLB e BDLB	150
4.8 Ensaios de Desempenho Realizados em Laboratório	151
4.8.1 Ensaios de avaliação do módulo de deformabilidade e do ângulo de fase	151
4.8.2 Ensaios de avaliação da resistência à fadiga.....	154
4.8.3 Ensaios de avaliação da resistência à deformação permanente	158
- Ensaio de compressão uniaxial de cargas repetidas	158
- Ensaios de compressão triaxial de cargas repetidas	160
- Ensaios com simulador de tráfego (<i>Wheel Tracking</i>).....	165
4.9 Avaliação Estrutural com Deflectómetro de Impacto	165
4.10 Considerações Finais	169
4.11 Referências Bibliográficas	169

5 ANÁLISE DE RESULTADOS

5.1 Considerações Iniciais	173
5.2 Metodologias de Apresentação e Análise dos Resultados dos Ensaios de Desempenho.....	174
5.2.1 Ensaios de avaliação do módulo de deformabilidade e do ângulo de fase	174
5.2.2 Ensaios de avaliação da resistência à fadiga.....	179
- Método geral	179
- Método geral adaptado	181
- Método da energia dissipada	183
- Método da energia dissipada adaptado.....	185
- Método adoptado.....	188
5.2.3 Ensaios de avaliação da resistência à deformação permanente	189
- Ensaios de compressão uniaxial de cargas repetidas.....	189
- Ensaios de compressão triaxial de cargas repetidas	193
- Ensaios com simulador de tráfego.....	195
5.3 Apresentação e Análise dos Resultados das Misturas MBTE.....	196
5.3.1 Módulos de deformabilidade e ângulos de fase.....	196
- Influência da taxa de reciclagem e da percentagem de betume	197
- Influência das condições de ensaio	198
- Relação entre o módulo de deformabilidade e o ângulo de fase	202
5.3.2 Resistência à fadiga	204
5.3.3 Resistência à deformação permanente.....	207
- Ensaios de compressão uniaxial de cargas repetidas.....	208
- Ensaios de compressão triaxial de cargas repetidas	211
- Ensaios com simulador de tráfego.....	215
- Considerações sobre o comportamento à deformação permanente	217
5.3.4 Análise global do desempenho das misturas	219
5.4 Apresentação e Análise dos Resultados das Misturas MBLB	221
5.4.1 Módulos de deformabilidade e ângulos de fase.....	221
- Influência da taxa de reciclagem e do tipo de betume de adição.....	223
- Influência das condições de ensaio	224
- Relação entre o módulo de deformabilidade e o ângulo de fase	226
5.4.2 Resistência à fadiga	228

5.4.3	Resistência à deformação permanente.....	230
5.4.4	Análise global do desempenho das misturas	232
5.5	Apresentação e Análise dos Resultados das Misturas BDLB.....	233
5.5.1	Módulos de deformabilidade e ângulos de fase.....	233
	- Influência da taxa de reciclagem e da percentagem de betume.....	233
	- Influência das condições de ensaio	234
	- Relação entre o módulo de deformabilidade e o ângulo de fase	235
5.5.2	Resistência à fadiga.....	236
5.5.3	Resistência à deformação permanente.....	238
5.5.4	Análise global do desempenho das misturas	239
5.6	Considerações Finais	240
5.7	Referências Bibliográficas.....	241

6 ORIENTAÇÕES PARA A RECICLAGEM A QUENTE EM CENTRAL

6.1	Considerações Iniciais	243
6.2	Tratamento e Caracterização do Material Fresado	245
6.2.1	Obtenção e armazenamento.....	245
6.2.2	Caracterização	248
6.2.3	Identificação e classificação.....	249
6.2.4	Campos de aplicação e requisitos de conformidade.....	250
6.3	Formulação das Misturas.....	250
6.3.1	Nota introdutória	250
6.3.2	Método de formulação proposto.....	251
6.3.3	Caracterização dos materiais	252
6.3.4	Estabelecimento da composição de base (Método A)	253
6.3.5	Estabelecimento da composição de base (Método B)	254
6.3.6	Fórmula para execução.....	255
6.4	Centrais de Fabrico.....	256
6.5	Aplicação e Controlo de Qualidade.....	258
6.6	Breve Análise Económica	259
6.6.1	Nota introdutória	259
6.6.2	Casos de estudo	260
6.6.3	Avaliação e apreciação dos custos das alternativas.....	262
6.7	Considerações Finais	266
6.8	Referências Bibliográficas.....	267

7 CONCLUSÕES GERAIS E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

7.1	Síntese do Trabalho e Conclusões Gerais.....	269
7.2	Desenvolvimentos Futuros	270
7.3	Considerações Finais	271

ANEXO I – RESULTADOS DOS ENSAIOS SOBRE PROVETES DE MACADAME BETUMINOSO DOS TRECHOS EXPERIMENTAIS

I.1	Designação das Misturas	273
I.2	Características Gerais das Misturas	273
I.3	Módulos de Deformabilidade e Ângulos de Fase	283
I.4	Resistência à Fadiga.....	292
I.5	Resistência à Deformação Permanente	297

ANEXO II – RESULTADOS DOS ENSAIOS SOBRE PROVETES DE MACADAME BETUMINOSO PRODUZIDOS EM LABORATÓRIO

II.1	Designação das Misturas	311
II.2	Características Gerais das Misturas	311
II.3	Módulos de Deformabilidade e Ângulos de Fase	316
II.4	Resistência à Fadiga.....	322
II.5	Resistência à Deformação Permanente - Compressão Uniaxial	325

ANEXO III – RESULTADOS DOS ENSAIOS SOBRE PROVETES DE BETÃO BETUMINOSO PRODUZIDOS EM LABORATÓRIO

III.1	Designação das Misturas	329
III.2	Características Gerais das Misturas	329
III.3	Módulos de Deformabilidade e Ângulos de Fase	332
III.4	Resistência à Fadiga.....	335
III.5	Resistência à Deformação Permanente - Compressão Uniaxial	337

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 – Evolução do consumo de betume em Portugal (APORBET, 1998 e 2002) e correspondente estimativa da produção de misturas betuminosas fabricadas a quente.....	2
Figura 1.2 – Evolução das despesas em conservação e beneficiação de estradas (Martinho, 2004)	2
Figura 1.3 – Percentagem reciclada de alguns materiais nos EUA (NAPA, 2005)	4
Figura 1.4 – Exemplo de depósito (com mais de cinco anos) de material proveniente de fresagem.....	4
Figura 2.1 – Esquema da obtenção de mistura reciclada a frio com cimento.....	10
Figura 2.2 – Esquema da obtenção de mistura reciclada a frio com emulsão betuminosa.....	11
Figura 2.3 – Esquema da obtenção de mistura reciclada a frio com betume-espuma	11
Figura 2.4 – Fases da reciclagem a frio <i>in situ</i> com cimento em calda (Martinho, 2004 - traduzido e adaptado de Wirtgen, 2004)	12
Figura 2.5 – Esquema de produção de mistura reciclada a frio <i>in situ</i> com emulsão betuminosa (adaptado de Wirtgen, 2004)	12
Figura 2.6 – Fases da reciclagem a frio <i>in situ</i> com emulsão betuminosa (Martinho, 2004 - traduzido e adaptado de Wirtgen, 2004).....	13
Figura 2.7 – Esquema da obtenção do betume-espuma (adaptado de Wirtgen, 2004).....	13
Figura 2.8 – Esquema da produção de mistura reciclada a frio <i>in situ</i> com betume-espuma (adaptado de Wirtgen, 2004).....	14
Figura 2.9 – Fases da reciclagem a frio <i>in situ</i> com betume-espuma (Martinho, 2004 - traduzido e adaptado de Wirtgen, 2004)	14
Figura 2.10 – Fases da reciclagem a quente <i>in situ</i> (Martinho e Picado-Santos, 2006)	15
Figura 2.11 – Esquema do processo de reciclagem em central com emulsão betuminosa (adaptado de Wirtgen, 2003).....	15
Figura 2.12 – Esquema da reciclagem a frio em central com betume-espuma (adaptado de Wirtgen, 2003).....	16
Figura 2.13 – Esquema do processo de reciclagem semi-quente em central (adaptado de Wirtgen, 2003)	16
Figura 2.14 – Esquema do processo de reciclagem a quente em central (adaptado de Wirtgen, 2003)	17
Figura 2.15 – Esquema dos materiais constituintes de uma mistura betuminosa reciclada a quente com betume.....	18
Figura 2.16 – Esquema de funcionamento de central betuminosa descontínua com incorporação de material fresado a frio (adaptado de EAPA, 1998).....	22
Figura 2.17 – Esquema de funcionamento de central betuminosa descontínua com incorporação de material fresado a quente (adaptado de EAPA, 1998)	23
Figura 2.18 – Esquema de funcionamento de central betuminosa descontínua com incorporação de material fresado pelo método <i>Recyclelean</i> (adaptado de EAPA, 1998).....	23
Figura 2.19 – Esquema de funcionamento de central de torre com incorporação de material fresado a frio (adaptado de EAPA, 1998)	24
Figura 2.20 – Esquema de central betuminosa contínua adaptada ao fabrico de MBRQ (adaptado de EAPA, 1998).....	25

Figura 2.21 – Esquema do TSM de central contínua de fluxos paralelos (adaptado de Brock, 2003).....	25
Figura 2.22 – Esquema de TSM de central contínua de fluxos contracorrente (adaptado de Brock, 2003)	26
Figura 2.23 – Esquema de central contínua de tambor duplo (adaptado de Brock, 2003).....	26
Figura 2.24 – Temperaturas observadas em centrais contínuas de fluxos contracorrente e de tambor duplo, para 5% de humidade do material fresado (Brock e Richmond, 2006).....	27
Figura 2.25 – Esquema do equilíbrio térmico no fabrico de mistura reciclada a quente	30
Figura 3.1 – Esquema da composição dum mistura betuminosa compactada (adaptado de Branco <i>et al.</i> , 2000)	40
Figura 3.2 – Composição dum mistura betuminosa reciclada a quente compactada	43
Figura 3.3 – Esquema seguido na caracterização de betumes segundo a metodologia americana	49
Figura 3.4 – Resposta a tensão vertical de carga rolante em pavimento rodoviário	53
Figura 3.5 – Curvas sinusoidais de tensão e extensão (ângulos de fase de 0°, 45° e 90°)	54
Figura 3.6 – Curvas histeréticas tensão-extensão (ângulos de fase de 0°, 45° e 90°)	54
Figura 3.7 – Zonas climáticas de Portugal Continental (Baptista e Picado-Santos, 2002)	58
Figura 3.8 – Evolução típica da tensão, da extensão e do módulo de deformabilidade, em ensaios de fadiga em extensão controlada e em tensão controlada.....	60
Figura 3.9 – Equipamento para ensaios de flexão da USFC - Brasil (Momm, 2005).....	62
Figura 3.10 – Equipamento para realização de ensaios com aplicação de cargas repetidas (DEC-FCTUC) usado em ensaios de flexão em quatro pontos.....	63
Figura 3.11 – Representação esquemática do equipamento para realização de ensaios de tracção indirecta (adaptado de CEN, 2004-c).....	64
Figura 3.12 – Representação esquemática do acréscimo de tensões devido à acção de carga rolante.....	68
Figura 3.13 – Esquema de funcionamento da prensa de corte giratória (Picado-Santos, 2005, adaptado de LCPC, 2003) e aspecto do equipamento instalado no DEC-FCTUC.....	70
Figura 3.14 – Organograma do método americano <i>Superpave Mix Design System</i> para formulação de misturas betuminosas (Capitão, 2003, adaptado de Francken, 1998).....	72
Figura 3.15 – Organograma do método de formulação adaptável às condições tecnológicas portuguesas (adaptado de Picado-Santos, 2005)	73
Figura 3.16 – Parâmetros usados na prensa de corte giratória.....	75
Figura 3.17 – Organograma da metodologia geral de formulação de misturas betuminosas recicladas a quente	78
Figura 3.18 – Ábaco para estimar a penetração do ligante final de mistura reciclada a quente.....	80
Figura 3.19 – Ábaco para determinar a viscosidade do betume novo (<i>Asphalt Institute</i> , 1986).....	83
Figura 3.20 – Esquema seguido na caracterização de ligante recuperado do material fresado pela metodologia <i>Superpave</i> (adaptado de Bardesi <i>et al.</i> , 2002)	85
Figura 3.21 – Representação gráfica da obtenção das temperaturas críticas do betume novo (T_{cN}) em função da taxa de reciclagem e das temperaturas críticas do ligante do fresado (T_{cF}) e do ligante final (T_{cR}) ...	86
Figura 3.22 – Representação gráfica da obtenção da TR em função das temperaturas críticas do betume novo (T_{cN}), do ligante do fresado (T_{cF}) e do ligante final (T_{cR}).....	87
Figura 3.23 – Organograma da metodologia adoptada para formulação de misturas betuminosas recicladas a quente.....	91
Figura 3.24 – Verificação do fuso granulométrico (TR = 40%)	94
Figura 4.1 – Curvas granulométricas de três amostras de material fresado usado nas misturas de macadame betuminoso (sem desagregação).....	107
Figura 4.2 – Equipamento usado na determinação da percentagem de betume por incineração	107
Figura 4.3 – Curvas granulométricas do material fresado (com e sem betume)	107

Figura 4.4 – Evaporador rotativo usado na recuperação de betume	109
Figura 4.5 – Curvas granulométricas dos agregados novos usados no fabrico das misturas de macadame betuminoso dos trechos experimentais.....	110
Figura 4.6 – Relação entre a taxa de reciclagem e a proporção dos agregados na mistura	111
Figura 4.7 – Exemplo de verificação do fuso granulométrico (TR = 30%).....	111
Figura 4.8 – Curvas granulométricas do agregado do material fresado usado nas misturas de macadame betuminoso (MBTE e MBLB) e de betão betuminoso (BDLB)	117
Figura 4.9 – Curvas granulométricas dos agregados novos usados nas misturas BDLB.....	118
Figura 4.10 – Encaixe das composições BB-FN e BB-GR no fuso granulométrico	119
Figura 4.11 – Curvas granulométricas dos constituintes e posicionamento da composição BR-FN no fuso granulométrico	120
Figura 4.12 – Curvas granulométricas dos constituintes e posicionamento da composição BR-GR no fuso granulométrico	120
Figura 4.13 – Curvas para estabelecimento da percentagem óptima de betume, obtidas pelo método de <i>Marshall</i> , para as composições BB-FN e BB-GR, com indicação dos valores correspondentes à percentagem óptima de betume.....	122
Figura 4.14 – Curvas para estabelecimento da percentagem óptima de betume, obtidas pelo método de <i>Marshall</i> , para as composições BR-FN e BR-GR, com indicação dos valores correspondentes à percentagem óptima de betume.....	123
Figura 4.15 – Curvas para determinação da deformação e do VMA, obtidas pelo método de <i>Marshall</i> , com indicação dos valores correspondentes à percentagem óptima de betume, para as composições BB-FN e BB-GR	124
Figura 4.16 – Curvas para determinação dos valores de deformação e do VMA, obtidos pelo método de <i>Marshall</i> , com indicação dos valores correspondentes à percentagem óptima de betume, para as composições BR-FN e BR-GR	125
Figura 4.17 – Esquema em planta da localização relativa dos trechos experimentais.....	128
Figura 4.18 – Esquema de central betuminosa descontínua: central de torre (EAPA, 1998)	129
Figura 4.19 – Rejeição de material fresado de maior dimensão	129
Figura 4.20 – Temperatura de aquecimento dos agregados (2% de humidade do fresado).....	131
Figura 4.21 – Capacidade de produção no fabrico das misturas aplicadas nos trechos experimentais.....	133
Figura 4.22 – Temperatura dos agregados (prevista e observada), do betume e das misturas, no fabrico e aplicação nos trechos experimentais	134
Figura 4.23 – Temperatura final da mistura (prevista e observada)	135
Figura 4.24 – Execução dos trechos experimentais	135
Figura 4.25 – Aspecto das operações de mistura e compactação em laboratório (lajes)	137
Figura 4.26 – Aspecto do compactador com placa vibratória	137
Figura 4.27 – Fases do levantamento de lajetas nos trechos experimentais	139
Figura 4.28 – Esquema seguido na serragem das lajetas levantadas nos trechos experimentais	139
Figura 4.29 – Aspecto de dois provetes (viga e laje) depois de rectificadas	140
Figura 4.30 – Operações de extracção dos tarolos de 150 mm de diâmetro	140
Figura 4.31 – Operação de corte dos tarolos de 150 mm de diâmetro e exemplo de provete após rectificação..	140
Figura 4.32 – Esquema seguido no corte das lajes compactadas em laboratório, para obtenção das vigas das misturas MBLB e BDLB	141
Figura 4.33 – Aspecto das 40 vigas das misturas BDLB.....	142
Figura 4.34 – Carotagem das lajes das misturas BDLB e aspecto dos tarolos da mistura R2	142
Figura 4.35 – Procedimento de colagem dos provetes das misturas MBLB	142
Figura 4.36 – Granulometria prevista e média das misturas do trecho C	144
Figura 4.37 – Aspecto dos provetes extraídos dos trechos experimentais, depois de rectificadas	145

Figura 4.38 – Aspecto dos provetes <i>Marshall</i> das misturas MBTE (trecho A e trecho B), moldados em laboratório	145
Figura 4.39 – Equipamento para realização do ensaio de compressão <i>Marshall</i>	146
Figura 4.40 – Máquina de ensaios com aplicação de cargas repetidas (FCTUC).....	151
Figura 4.41 – Representação da relação entre a frequência de ensaio e a velocidade média da corrente de tráfego e o tempo de carregamento	153
Figura 4.42 – Exemplos de evolução da extensão em ensaio de flexão de cargas repetidas realizado a 10 Hz (misturas D1 e R1)	154
Figura 4.43 – Exemplos de evolução do módulo de deformabilidade em ensaio de flexão de cargas repetidas realizado a 10 Hz (misturas D1 e R1)	155
Figura 4.44 – Exemplos de evolução do ângulo de fase, em ensaio de flexão de cargas repetidas realizado a 10 Hz (misturas D1 e R1).....	155
Figura 4.45 – Exemplo de evolução do módulo de deformabilidade (proвете D1-V04)	156
Figura 4.46 – Exemplo de evolução do ângulo de fase (proвете D1-V04).....	157
Figura 4.47 – Exemplo de evolução da energia dissipada acumulada (proвете D1-V04)	157
Figura 4.48 – Exemplo de forma da onda sinusoidal de carregamento adoptada e da correspondente evolução do deslocamento.....	159
Figura 4.49 – Aspecto da máquina de ensaios com aplicação de cargas repetidas (FCTUC), quando usada em ensaios de compressão uniaxial.....	160
Figura 4.50 – Representação do carregamento sinusoidal (adaptado de CEN, 2005)	161
Figura 4.51 – Representação do carregamento pulsatório com repouso (adaptado de CEN, 2005)	161
Figura 4.52 – Diferentes configurações para os equipamentos de ensaios de compressão.....	162
Figura 4.53 – Aspecto do equipamento para realização de ensaios de compressão triaxial (DEC-FCTUC).....	162
Figura 4.54 – Colocação de uma resistência eléctrica envolvendo a câmara triaxial para.....	163
Figura 4.55 – Diferentes fases da preparação do ensaio de compressão triaxial cíclico (Gardete, 2005).....	164
Figura 4.56 – Aspecto do simulador de tráfego <i>Wessex Wheel Tracker</i> , DEC-FCTUC.....	165
Figura 4.57 – Aspecto do deflectómetro de impacto, UC-UM	166
Figura 4.58 – Estrutura-tipo considerada na análise inversa.....	166
Figura 4.59 – Comparação entre os módulos de deformabilidade a 25°C, obtidos na avaliação com FWD e estimados pelas expressões da Shell	167
Figura 5.1 – Exemplo de curvas isotérmicas do módulo de deformabilidade e do ângulo de fase (mistura D1)	175
Figura 5.2 – Exemplo de curvas isócronas do módulo de deformabilidade e do ângulo de fase (mistura D1)....	175
Figura 5.3 – Exemplo de curvas mestras do módulo de deformabilidade das misturas D1e D3	176
Figura 5.4 – Exemplo de relação entre o módulo de deformabilidade e o ângulo de fase, representada no diagrama de <i>Black</i> (mistura D1).....	177
Figura 5.5 – Relação entre as partes real (E_1) e imaginária (E_2) do módulo de deformabilidade, representada no diagrama de <i>Cole-Cole</i> (Momm, 2005).....	178
Figura 5.6 – Exemplo de relação entre as partes real (E_1) e imaginária (E_2) do módulo de deformabilidade, representada no diagrama de <i>Cole-Cole</i> (mistura D1)	178
Figura 5.7 – Exemplo de evolução do módulo de deformabilidade em ensaio de fadiga, com provetes da mesma mistura (D2), para três níveis de extensão controlada.....	179
Figura 5.8 – Exemplo de evolução do módulo de deformabilidade em ensaio de fadiga, com provetes das misturas R1 e R2, para uma extensão controlada de 500 microns	180
Figura 5.9 – Exemplo de lei de fadiga (mistura D2).....	181
Figura 5.10 – Exemplos de ajuste dos resultados de ensaios de fadiga a uma lei do tipo $E_m = E_0 \times e^{b \cdot N}$	181
Figura 5.11 – Exemplo de lei de fadiga admitindo lei de ajuste $E_m = E_0 e^{b \cdot N}$ (mistura D2).....	182
Figura 5.12 – Exemplo de relação tensão/extensão em diferentes ciclos de ensaio de fadiga.....	183

Figura 5.13 – Exemplo de relação entre a energia dissipada, por unidade de volume, e o número de ciclos de carga em ensaio de fadiga (mistura D2).....	184
Figura 5.14 – Exemplo de relação entre a energia dissipada, por unidade de volume, e o número de ciclos de carga de ensaio de fadiga (mistura D2).....	185
Figura 5.15 – Exemplo de evolução da energia dissipada acumulada com o número de ciclos de carga (provete R1-V07).....	186
Figura 5.16 – Representação gráfica da aplicação do método da energia dissipada adaptado	187
Figura 5.17 – Leis de fadiga da mistura D2, obtidas por aplicação do método da energia dissipada adaptado ..	188
Figura 5.18 – Leis de fadiga da mistura D2, obtidas pelo método geral, pelo método geral adaptado e pelo método da energia dissipada adaptado.....	189
Figura 5.19 – Evolução típica em ensaio de compressão uniaxial de cargas repetidas (adaptado de CEN, 2005).....	189
Figura 5.20 – Evolução da extensão axial permanente ao longo de ensaio de compressão uniaxial de cargas repetidas (provete B2-C07).....	190
Figura 5.21 – Evolução do módulo de fluência e do módulo resiliente em ensaio de compressão uniaxial de cargas repetidas (provete B2-C07).....	193
Figura 5.22 – Exemplo de ajuste à evolução da extensão axial permanente em ensaios de compressão triaxial de cargas repetidas (provete C3-C01).....	194
Figura 5.23 – Exemplo de curva de deformação obtida com simulador de tráfego.....	195
Figura 5.24 – Representação gráfica do módulo de deformabilidade das misturas aplicadas nos trechos experimentais (frequência de 10 Hz)	198
Figura 5.25 – Representação gráfica das envolventes das curvas isócronas dos módulos de deformabilidade e dos ângulos de fase, a 10 Hz, das misturas dos trechos experimentais	199
Figura 5.26 – Envolventes das curvas isotérmicas dos módulos de deformabilidade e dos ângulos de fase, das misturas dos trechos experimentais	199
Figura 5.27 – Relação entre os módulos de deformabilidade das misturas MBTE a 5 Hz (Em5) e a 1 Hz (Em1) e o módulo de deformabilidade a 10 Hz (Em10).....	200
Figura 5.28 – Relação entre os valores medidos e os estimados para os módulos de deformabilidade das misturas MBTE a 5 Hz (Em5) e a 1 Hz (Em1).	201
Figura 5.29 – Relação entre os módulos de deformabilidade das misturas MBTE a 15°C (Em15) e a 40°C (Em40) e o módulo de deformabilidade a 25°C (Em25).....	201
Figura 5.30 – Representação da relação entre o módulo de deformabilidade e o ângulo de fase no diagrama de <i>Black</i> , para frequências de 10 Hz e 5 Hz (misturas MBTE).....	203
Figura 5.31 – Representação no diagrama de <i>Cole-Cole</i> , para frequências de 10 Hz e 5 Hz (misturas MBTE).	203
Figura 5.32 – Representação gráfica das leis de fadiga das misturas A1, A2 e A3.....	204
Figura 5.33 – Representação gráfica das leis de fadiga das misturas B1, B2 e B3.....	204
Figura 5.34 – Representação gráfica das leis de fadiga das misturas C1, C2 e C3.....	205
Figura 5.35 – Representação gráfica das leis de fadiga das misturas D1, D2 e D3.....	205
Figura 5.36 – Representação gráfica da extensão de tracção para que haja rotura do material ao fim de um milhão de ciclos, para as misturas MBTE.....	206
Figura 5.37 – Representação gráfica da relação entre a extensão de tracção correspondente a um milhão de ciclos e a percentagem de betume, para as misturas MBTE	207
Figura 5.38 – Representação gráfica da extensão de tracção para um milhão de ciclos, obtida pelo método geral e pelo método da energia dissipada adaptado, para as misturas MBTE.....	207
Figura 5.39 – Evolução da extensão axial permanente observada no ensaio de compressão uniaxial de cargas repetidas, para as misturas do trecho A.....	208
Figura 5.40 – Evolução da extensão axial permanente observada no ensaio de compressão uniaxial de cargas repetidas, para as misturas do trecho B.....	208

Figura 5.41 – Evolução da extensão axial permanente observada no ensaio de compressão uniaxial de cargas repetidas, para as misturas do trecho C	209
Figura 5.42 – Evolução da extensão axial permanente observada no ensaio de compressão uniaxial de cargas repetidas, para as misturas do trecho D	209
Figura 5.43 – Representação gráfica da extensão axial permanente das misturas MBTE, medida nos ensaios de compressão uniaxial de cargas repetidas	210
Figura 5.44 – Representação gráfica da velocidade de deformação das misturas MBTE, medida nos ensaios de compressão uniaxial de cargas repetidas	210
Figura 5.45 – Representação gráfica do módulo resiliente das misturas MBTE, medido nos ensaios de compressão uniaxial de cargas repetidas	211
Figura 5.46 – Representação gráfica da relação entre o módulo resiliente, medido em ensaios de compressão uniaxial, e a percentagem de betume das misturas MBTE	211
Figura 5.47 – Curvas de deformação axial permanente observadas no ensaio de compressão triaxial de cargas repetidas (misturas do trecho A)	212
Figura 5.48 – Curvas de deformação axial permanente observadas no ensaio de compressão triaxial de cargas repetidas (misturas do trecho B)	212
Figura 5.49 – Curvas de deformação axial permanente observadas no ensaio de compressão triaxial de cargas repetidas (misturas do trecho C)	212
Figura 5.50 – Curvas de deformação axial permanente observadas no ensaio de compressão triaxial de cargas repetidas (misturas do trecho D)	213
Figura 5.51 – Representação gráfica da extensão axial permanente das misturas MBTE, medida nos ensaios de compressão triaxial de cargas repetidas	214
Figura 5.52 – Representação gráfica da velocidade de deformação das misturas MBTE, medida nos ensaios de compressão triaxial de cargas repetidas	214
Figura 5.53 – Representação gráfica do módulo resiliente das misturas MBTE, medido nos ensaios de compressão triaxial de cargas repetidas	214
Figura 5.54 – Evolução do valor médio da deformação permanente observada no ensaio com simulador de tráfego (misturas do trecho A)	215
Figura 5.55 – Evolução do valor médio da deformação permanente observada no ensaio com simulador de tráfego (misturas do trecho B)	215
Figura 5.56 – Evolução do valor médio da deformação permanente observada no ensaio com simulador de tráfego (misturas do trecho C)	216
Figura 5.57 – Evolução do valor médio da deformação permanente observada no ensaio com simulador de tráfego (misturas do trecho D)	216
Figura 5.58 – Representação gráfica da deformação permanente das misturas MBTE, medida nos ensaios com simulador de tráfego	217
Figura 5.59 – Representação gráfica da velocidade de deformação das misturas MBTE, medida nos ensaios com simulador de tráfego	217
Figura 5.60 – Deformação permanente das misturas MBTE em função da porosidade	218
Figura 5.61 – Deformação permanente das misturas MBTE em função da percentagem de betume	218
Figura 5.62 – Representação gráfica do indicador de desempenho das misturas MBTE	221
Figura 5.63 – Representação gráfica do módulo de deformabilidade das misturas MBLB, para frequência de 10 Hz	222
Figura 5.64 – Representação gráfica do módulo de deformabilidade das misturas MBLB, com taxas de reciclagem de 30% (LC, LE e LG) e 40% (LD, LF e LH), para frequência de 10 Hz	223
Figura 5.65 – Relação entre o módulo de deformabilidade das misturas MBLB (medido a 10 Hz) e a estimativa da penetração do ligante final	224

Figura 5.66 – Relação entre os módulos de deformabilidade das misturas MBLB a 5 Hz (Em5) e a 1 Hz (Em1) e o módulo de deformabilidade a 10 Hz (Em10).....	225
Figura 5.67 – Relação entre os módulos de deformabilidade das misturas MBLB a 15°C (Em15) e a 40°C (Em40) e o módulo de deformabilidade a 25°C (Em25).....	225
Figura 5.68 – Representação da relação entre o módulo de deformabilidade e o ângulo de fase no diagrama de <i>Black</i> , para frequências de 10 Hz e 5 Hz (misturas MBLB)	227
Figura 5.69 – Representação no diagrama de <i>Cole-Cole</i> , para os três tipos de betume, frequências de 10 Hz e 5 Hz (misturas MBLB)	227
Figura 5.70 – Representação gráfica das leis de fadiga das misturas LA, LB, LC e LD.....	228
Figura 5.71 – Representação gráfica das leis de fadiga das misturas LE, LF, LG e LH	228
Figura 5.72 – Representação gráfica da extensão de tracção para um milhão de ciclos (misturas MBLB), obtida pelo método geral e pelo método da energia dissipada adaptado.....	229
Figura 5.73 – Evolução da extensão axial permanente em ensaio de compressão uniaxial de cargas repetidas (misturas LA, LB, LC e LD).....	230
Figura 5.74 – Evolução da extensão axial permanente em ensaio de compressão uniaxial de cargas repetidas (misturas LE, LF, LG e LH)	230
Figura 5.75 – Representação gráfica da extensão axial permanente das misturas MBLB, medida em ensaio de compressão uniaxial de cargas repetidas.....	231
Figura 5.76 – Representação gráfica da velocidade de deformação das misturas MBLB, medida em ensaio de compressão uniaxial de cargas repetidas.....	231
Figura 5.77 – Representação gráfica do módulo resiliente das misturas MBLB, medido em ensaio de compressão uniaxial de cargas repetidas.....	232
Figura 5.78 – Representação gráfica do indicador de desempenho das misturas MBLB	233
Figura 5.79 – Representação dos valores do módulo de deformabilidade das misturas BDLB, medidos a 10 Hz.....	234
Figura 5.80 – Relação entre os módulos de deformabilidade das misturas BDLB a 5 Hz (Em5) e a 1 Hz (Em1) e o módulo de deformabilidade a 10 Hz (Em10).....	234
Figura 5.81 – Relação entre os módulos de deformabilidade das misturas BDLB a 15°C (Em15) e 40°C (Em40) e o módulo de deformabilidade a 25°C (Em25).....	235
Figura 5.82 – Representação da relação entre o módulo de deformabilidade e o ângulo de fase no diagrama de <i>Black</i> , para frequências de 10 Hz + 5 Hz (misturas BDLB).....	236
Figura 5.83 – Representação no diagrama de <i>Cole-Cole</i> , para as frequências de 10 Hz + 5 Hz (misturas BDLB)	236
Figura 5.84 – Representação das leis de fadiga das misturas BDLB.....	237
Figura 5.85 – Representação da extensão correspondente a um milhão de ciclos (BDLB)	237
Figura 5.86 – Relação entre a extensão correspondente a um milhão de ciclos e a percentagem de betume (misturas BDLB).....	238
Figura 5.87 – Evolução da extensão axial permanente em ensaio de compressão uniaxial de cargas repetidas (misturas BDLB).....	238
Figura 5.88 – Extensão axial permanente e velocidade de deformação das misturas BDLB	239
Figura 5.89 – Representação gráfica do indicador de desempenho das misturas BDLB.....	239
Figura 6.1 – Esquema das soluções de reabilitação com aplicação de camada de reforço sem fresagem e com fresagem (adaptado de Brock, 2003)	243
Figura 6.2 – Mapa de posicionamento das alternativas de reciclagem na análise SWOT (Martinho e Picado-Santos, 2005)	244
Figura 6.3 – Fresagem de camadas de pavimento e placas de pavimento (Ibarra, 2003).....	245

Figura 6.4 – Esquema do processo de alimentação de central com britagem do material fresado (adaptado de Brock, 2003).....	246
Figura 6.5 – Esquema do processo de britagem para obtenção do material fresado com determinada dimensão máxima (adaptado de Brock, 2003)	247
Figura 6.6 – Esquema do processo de britagem para obtenção do material fresado separado em duas fracções (adaptado de Brock, 2003)	247
Figura 6.7 – Esquema das pilhas de armazenamento do material fresado por camadas e da introdução na unidade de alimentação (AIPCR, 2003).....	248
Figura 6.8 – Organograma da metodologia proposta para a formulação de misturas betuminosas recicladas a quente (Método A)	251
Figura 6.9 – Organograma da metodologia proposta para a formulação de misturas betuminosas recicladas a quente (Método B)	252
Figura 6.10 – Representação gráfica da determinação dos limites da penetração do betume novo a usar em mistura betuminosa reciclada a quente.....	253
Figura 6.11 – Ábacos para selecção do tipo de betume a usar.....	254
Figura 6.12 – Representação gráfica da determinação dos limites da taxa de reciclagem de betume a usar em mistura betuminosa reciclada a quente.....	255
Figura 6.13 – Relação entre a temperatura de aquecimento dos agregados e a temperatura do material fresado (TR de 30%, mistura a 150°C e 5% de humidade do material fresado).....	258
Figura 6.14 – Representação esquemática da estrutura-tipo considerada na análise	260
Figura I.1 – Variação do módulo de deformabilidade e do ângulo de fase da mistura A1	284
Figura I.2 – Variação do módulo de deformabilidade e do ângulo de fase da mistura A2	284
Figura I.3 – Variação do módulo de deformabilidade e do ângulo de fase da mistura A3	285
Figura I.4 – Variação do módulo de deformabilidade e do ângulo de fase da mistura B1	286
Figura I.5 – Variação do módulo de deformabilidade e do ângulo de fase da mistura B2	286
Figura I.6 – Variação do módulo de deformabilidade e do ângulo de fase da mistura B3	287
Figura I.7 – Variação do módulo de deformabilidade e do ângulo de fase da mistura C1	288
Figura I.8 – Variação do módulo de deformabilidade e do ângulo de fase da mistura C2	288
Figura I.9 – Variação do módulo de deformabilidade e do ângulo de fase da mistura C3	289
Figura I.10 – Variação do módulo de deformabilidade e do ângulo de fase da mistura D1	290
Figura I.11 – Variação do módulo de deformabilidade e do ângulo de fase da mistura D2	290
Figura I.12 – Variação do módulo de deformabilidade e do ângulo de fase da mistura D3	291
Figura I.13 – Lei de fadiga da mistura A1	293
Figura I.14 – Lei de fadiga da mistura A2.....	293
Figura I.15 – Lei de fadiga da mistura A3.....	293
Figura I.16 – Lei de fadiga da mistura B1	294
Figura I.17 – Lei de fadiga da mistura B2	294
Figura I.18 – Lei de fadiga da mistura B3	294
Figura I.19 – Lei de fadiga da mistura C1	295
Figura I.20 – Lei de fadiga da mistura C2	295
Figura I.21 – Lei de fadiga da mistura C3	295
Figura I.22 – Lei de fadiga da mistura D1	296
Figura I.23 – Lei de fadiga da mistura D2.....	296
Figura I.24 – Lei de fadiga da mistura D3.....	296
Figura I.25 – Curvas de deformação axial permanente (mistura A1) e respectivos parâmetros.....	298
Figura I.26 – Curvas de deformação axial permanente (mistura A2) e respectivos parâmetros.....	298
Figura I.27 – Curvas de deformação axial permanente (mistura A3) e respectivos parâmetros.....	298

Figura I.28 – Curvas de deformação axial permanente (mistura B1) e respectivos parâmetros.....	299
Figura I.29 – Curvas de deformação axial permanente (mistura B2) e respectivos parâmetros.....	299
Figura I.30 – Curvas de deformação axial permanente (mistura B3) e respectivos parâmetros.....	299
Figura I.31 – Curvas de deformação axial permanente (mistura C1) e respectivos parâmetros.....	300
Figura I.32 – Curvas de deformação axial permanente (mistura C2) e respectivos parâmetros.....	300
Figura I.33 – Curvas de deformação axial permanente (mistura C3) e respectivos parâmetros.....	300
Figura I.34 – Curvas de deformação axial permanente (mistura D1) e respectivos parâmetros.....	301
Figura I.35 – Curvas de deformação axial permanente (mistura D2) e respectivos parâmetros.....	301
Figura I.36 – Curvas de deformação axial permanente (mistura D3) e respectivos parâmetros.....	301
Figura I.37 – Parâmetros e curvas de deformação permanente em ensaio triaxial (mistura A1).....	302
Figura I.38 – Parâmetros e curvas de deformação permanente em ensaio triaxial (mistura A2).....	302
Figura I.39 – Parâmetros e curvas de deformação permanente em ensaio triaxial (mistura A3).....	302
Figura I.40 – Parâmetros e curvas de deformação permanente em ensaio triaxial (mistura B1).....	303
Figura I.41 – Parâmetros e curvas de deformação permanente em ensaio triaxial (mistura B2).....	303
Figura I.42 – Parâmetros e curvas de deformação permanente em ensaio triaxial (mistura B3).....	303
Figura I.43 – Parâmetros e curvas de deformação permanente em ensaio triaxial (mistura C1).....	304
Figura I.44 – Parâmetros e curvas de deformação permanente em ensaio triaxial (mistura C2).....	304
Figura I.45 – Parâmetros e curvas de deformação permanente em ensaio triaxial (mistura C3).....	304
Figura I.46 – Parâmetros e curvas de deformação permanente em ensaio triaxial (mistura D1).....	305
Figura I.47 – Parâmetros e curvas de deformação permanente em ensaio triaxial (mistura D2).....	305
Figura I.48 – Parâmetros e curvas de deformação permanente em ensaio triaxial (mistura D3).....	305
Figura I.49 – Curva de deformação permanente em simulador de tráfego (mistura A1)	306
Figura I.50 – Curva de deformação permanente em simulador de tráfego (mistura A2)	306
Figura I.51 – Curva de deformação permanente em simulador de tráfego (mistura A3)	306
Figura I.52 – Curva de deformação permanente em simulador de tráfego (mistura B1).....	307
Figura I.53 – Curva de deformação permanente em simulador de tráfego (mistura B2).....	307
Figura I.54 – Curva de deformação permanente em simulador de tráfego (mistura B3).....	307
Figura I.55 – Curva de deformação permanente em simulador de tráfego (mistura C1).....	308
Figura I.56 – Curva de deformação permanente em simulador de tráfego (mistura C2).....	308
Figura I.57 – Curva de deformação permanente em simulador de tráfego (mistura C3).....	308
Figura I.58 – Curva de deformação permanente em simulador de tráfego (mistura D1)	309
Figura I.59 – Curva de deformação permanente em simulador de tráfego (mistura D2)	309
Figura I.60 – Curva de deformação permanente em simulador de tráfego (mistura D3)	309
Figura II.1 – Variação do módulo de deformabilidade e do ângulo de fase da mistura LA	316
Figura II.2 – Variação do módulo de deformabilidade e do ângulo de fase da mistura LB	317
Figura II.3 – Variação do módulo de deformabilidade e do ângulo de fase da mistura LC	318
Figura II.4 – Variação do módulo de deformabilidade e do ângulo de fase da mistura LD	318
Figura II.5 – Variação do módulo de deformabilidade e do ângulo de fase da mistura LE.....	319
Figura II.6 – Variação do módulo de deformabilidade e do ângulo de fase da mistura LF.....	320
Figura II.7 – Variação do módulo de deformabilidade e do ângulo de fase da mistura LG	320
Figura II.8 – Variação do módulo de deformabilidade e do ângulo de fase da mistura LH.....	321
Figura II.9 – Lei de fadiga da mistura LA	322
Figura II.10 – Lei de fadiga da mistura LB	323
Figura II.11 – Lei de fadiga da mistura LC	323
Figura II.12 – Lei de fadiga da mistura LD	323
Figura II.13 – Lei de fadiga da mistura LE	324
Figura II.14 – Lei de fadiga da mistura LF.....	324

Figura II.15 – Lei de fadiga da mistura LG	324
Figura II.16 – Lei de fadiga da mistura LH	325
Figura II.17 – Curvas de deformação permanente da mistura LA e respectivos parâmetros.....	326
Figura II.18 – Curvas de deformação permanente da mistura LB e respectivos parâmetros	326
Figura II.19 – Curvas de deformação permanente da mistura LC e respectivos parâmetros	326
Figura II.20 – Curvas de deformação permanente da mistura LD e respectivos parâmetros.....	327
Figura II.21 – Curvas de deformação permanente da mistura LE e respectivos parâmetros	327
Figura II.22 – Curvas de deformação permanente da mistura LF e respectivos parâmetros	327
Figura II.23 – Curvas de deformação permanente da mistura LG e respectivos parâmetros.....	328
Figura II.24 – Curvas de deformação permanente da mistura LH e respectivos parâmetros.....	328
Figura III.1 – Variação do módulo de deformabilidade e do ângulo de fase da mistura M1	332
Figura III.2 – Variação do módulo de deformabilidade e do ângulo de fase da mistura M2.....	333
Figura III.3 – Variação do módulo de deformabilidade e do ângulo de fase da mistura R1.....	334
Figura III.4 – Variação do módulo de deformabilidade e do ângulo de fase da mistura R2.....	334
Figura III.5 – Lei de fadiga da mistura M1	335
Figura III.6 – Lei de fadiga da mistura M2.....	336
Figura III.7 – Lei de fadiga da mistura R1.....	336
Figura III.8 – Lei de fadiga da mistura R2.....	336
Figura III.9 – Curvas de deformação permanente da mistura M1 e respectivos parâmetros	337
Figura III.10 – Curvas de deformação permanente da mistura M2 e respectivos parâmetros	338
Figura III.11 – Curvas de deformação permanente da mistura R1 e respectivos parâmetros	338
Figura III.12 – Curvas de deformação permanente da mistura R2 e respectivos parâmetros	338

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 – Principais técnicas de reciclagem (adaptado de Martinho e Picado-Santos, 2005)	10
Quadro 2.2 – Dados sobre a reciclagem a quente em alguns países da Europa (Fonte: EAPA, 2003, 2004, 2005, 2006)	21
Quadro 2.3 – Principais obras com reciclagem a quente em central, realizadas em Portugal e estudos em curso (Rodrigues, 2006)	21
Quadro 2.4 – Calor específico dos materiais base (Picado-Santos, 1995)	31
Quadro 3.1 – Principais propriedades dos agregados das misturas betuminosas consideradas no CEEP e respectivas normas de ensaio (JAE, 1998)	46
Quadro 3.2 – Principais propriedades dos betumes asfálticos e respectivos métodos de ensaio (LNEC, 1997) ...	47
Quadro 3.3 – Tipos de betumes de pavimentação, propriedades e exigências de conformidade (LNEC, 1997)...	47
Quadro 3.4 – Tipos de betumes de pavimentação previstos na ASTM D 3381	48
Quadro 3.5 – Tipos de betumes considerados nos EUA de acordo com a graduação PG	48
Quadro 3.6 – Principais propriedades das misturas betuminosas consideradas no CEEP e respectivas normas de ensaio	51
Quadro 3.7 – Temperaturas para avaliação da resistência à deformação permanente em Portugal Continental ...	58
Quadro 3.8 – Resumo dos principais tipos de ensaios de avaliação das características de deformabilidade e da resistência à fadiga	61
Quadro 3.9 – Dimensões dos provetes trapezoidais para ensaios de flexão em dois pontos (CEN, 2004-d)	62
Quadro 3.10 – Dimensões das vigas para ensaios de flexão em dois pontos (CEN, 2004-d)	62
Quadro 3.11 – Número de rotações para os três níveis de compactação	74
Quadro 3.12 – Limites especificados para as misturas compactadas na PCG	76
Quadro 3.13 – Exemplos de estimativa da penetração do ligante final de mistura reciclada	80
Quadro 3.14 – Recomendações para selecção do betume novo (McDaniel e Anderson, 2001)	84
Quadro 3.15 – Características dos betumes e viscosidades consideradas na Austrália (Austroads, 2000)	88
Quadro 3.16 – Critérios de selecção do betume (Bardesi <i>et al.</i> , 2002)	89
Quadro 3.17 – Percentagem de betume do material fresado usado nos trechos experimentais	92
Quadro 3.18 – Resultados da análise granulométrica do agregado do material fresado (Picado-Santos, 2003) ...	93
Quadro 3.19 – Características do betume recuperado do material fresado	93
Quadro 3.20 – Resultados da análise granulométrica dos agregados novos e fuso	94
Quadro 3.21 – Resultados da composição granulométrica	94
Quadro 3.22 – Resumo dos resultados da aplicação da fórmula da superfície específica	95
Quadro 3.23 – Resumo do cálculo da penetração do ligante final	95
Quadro 3.24 – Resumo da percentagem de betume novo usadas no método de <i>Marshall</i>	96
Quadro 3.25 – Resumo dos resultados do estudo <i>Marshall</i> (TR = 30%)	96
Quadro 3.26 – Resumo dos resultados do estudo <i>Marshall</i> (TR = 40%)	96
Quadro 3.27 – Resumo dos resultados do estudo <i>Marshall</i> (TR = 50%)	97

Quadro 3.28 – Resumo das percentagens de betume novo (%) e respectiva percentagem óptima, obtidas pelo método de <i>Marshall</i> para as quatro composições estudadas.	97
Quadro 3.29 – Resumo das características das misturas correspondentes à percentagem óptima de betume, para as quatro composições estudadas	97
Quadro 4.1 – Tipo e número de misturas consideradas nos trabalhos experimentais	106
Quadro 4.2 – Percentagem de betume do material fresado usado nos trechos experimentais	107
Quadro 4.3 – Resultados da análise granulométrica do agregado do material fresado usado nas misturas de macadame betuminoso aplicadas nos trechos experimentais (após incineração).....	108
Quadro 4.4 – Características do betume recuperado do material fresado usado nas misturas dos trechos experimentais	109
Quadro 4.5 – Características físicas dos agregados calcários	110
Quadro 4.6 – Composição granulométrica dos agregados usados nas misturas MBTE	110
Quadro 4.7 – Limites da percentagem de betume (%) de acordo com a relação filer-betume.....	112
Quadro 4.8 – Resumo dos resultados da aplicação da fórmula da superfície específica (macadame betuminoso).....	113
Quadro 4.9 – Resumo dos limites da percentagem de betume (%) e valores adoptadas	114
Quadro 4.10 – Resumo das misturas de macadame betuminoso aplicadas nos trechos experimentais (MBTE). 114	
Quadro 4.11 – Resumo das misturas de macadame betuminoso produzidas e compactadas em laboratório (MBLB).....	115
Quadro 4.12 – Características dos betumes usados nas misturas MBLB	115
Quadro 4.13 – Percentagem de betume do material fresado usado no betão betuminoso	116
Quadro 4.14 – Resultados da análise granulométrica do agregado do material fresado usado nas misturas de betão betuminoso	116
Quadro 4.15 – Características do betume recuperado do material fresado usado nas misturas de betão betuminoso produzidas em laboratório	117
Quadro 4.16 – Características físicas dos agregados graníticos.....	118
Quadro 4.17 – Composição das misturas de agregados (novos e do MF) usadas na formulação do betão betuminoso	119
Quadro 4.18 – Resultados da fórmula da superfície específica (betão betuminoso).....	121
Quadro 4.19 – Resumo das percentagens de betume novo (%) e respectiva percentagem óptima, obtidas pelo método de <i>Marshall</i> para as quatro composições estudadas.	121
Quadro 4.20 – Resumo das características das misturas correspondentes à percentagem óptima de betume, para as quatro composições estudadas	125
Quadro 4.21 – Misturas de betão betuminoso produzidas e compactadas em laboratório.....	126
Quadro 4.22 – Fórmulas para alimentação do tambor secador	127
Quadro 4.23 – Fórmulas de trabalho da unidade de mistura, por 1000 kg (Trecho A).....	127
Quadro 4.24 – Fórmulas de trabalho da unidade de mistura, por 1000 kg (Trecho B).....	127
Quadro 4.25 – Fórmulas de trabalho da unidade de mistura, por 1000 kg (Trecho C).....	128
Quadro 4.26 – Fórmulas de trabalho da unidade de mistura, por 1000 kg (Trecho D).....	128
Quadro 4.27 – Tempo de pré-mistura (sem betume), tempo de mistura, massa total da amassadura e do fresado, para as misturas dos quatro trechos	130
Quadro 4.28 – Temperatura de aquecimento dos agregados novos e temperatura da mistura betuminosa final, para os quatro trechos e humidade do material fresado de 1% e 2%.....	131
Quadro 4.29 – Desempenho da central: valores previstos nas fórmulas de trabalho (kg), registados na central (kg) e respectivos desvios, para as misturas do trecho A	131
Quadro 4.30 – Desempenho da central: valores previstos nas fórmulas de trabalho (kg), registados na central (kg) e respectivos desvios, para as misturas do trecho B	132

Quadro 4.31 – Desempenho da central: valores previstos nas fórmulas de trabalho (kg), registados na central (kg) e respectivos desvios, para as misturas do trecho C	132
Quadro 4.32 – Desempenho da central: valores previstos nas fórmulas de trabalho (kg), registados na central (kg) e respectivos desvios, para as misturas do trecho D.....	132
Quadro 4.33 – Temperaturas médias (°C) dos agregados, do betume e das misturas à saída da central e na aplicação	133
Quadro 4.34 – Parâmetro R e temperatura média (°C) dos agregados, do betume e da mistura.....	134
Quadro 4.35 – Espessura (cm) dos tarolos recolhidos dos trechos experimentais.....	136
Quadro 4.36 – Temperatura dos componentes e da mistura final (misturas dos trechos experimentais e produzidas em laboratório com betume 35/50).....	138
Quadro 4.37 – Percentagem de betume (ligante total, em %): prevista, determinada por incineração e estimada a partir do registo da central e da percentagem de betume do fresado.....	144
Quadro 4.38 – Temperatura (°C) das misturas MBTE na fase de compactação nos trechos experimentais e durante a compactação dos provetes <i>Marshall</i> em laboratório	145
Quadro 4.39 – Baridade média (g/cm ³) dos provetes <i>Marshall</i> das misturas MBTE.....	146
Quadro 4.40 – Baridade máxima teórica (g/cm ³) das misturas MBTE	147
Quadro 4.41 – Resultados relativos aos provetes <i>Marshall</i> compactados em laboratório.....	147
Quadro 4.42 – Resultados relativos aos provetes <i>Marshall</i> dos trechos experimentais	147
Quadro 4.43 – Resistência conservada (%) das misturas MBTE	148
Quadro 4.44 – Características gerais dos provetes usados nos ensaios de desempenho (misturas MBTE).....	149
Quadro 4.45 – Características gerais dos provetes usados nos ensaios de desempenho (misturas MBLB)	150
Quadro 4.46 – Características gerais dos provetes usados nos ensaios de desempenho (misturas BDLB).....	150
Quadro 4.47 – Condições de ensaio para avaliação das características de deformabilidade	151
Quadro 4.48 – Conjuntos de valores de frequência e correspondentes tempos de carregamento e da velocidade média da corrente de tráfego.....	153
Quadro 4.49 – Resumo dos níveis de extensão considerados nos ensaios de fadiga.....	156
Quadro 4.50 – Parâmetros de aquisição de resultados nos ensaios de fadiga.....	157
Quadro 4.51 – Espessura da camada betuminosa (média e adoptada).....	167
Quadro 4.52 – Módulo de deformabilidade das camadas calculados a partir dos resultados dos ensaios com deflectómetro de impacto.....	167
Quadro 4.53 – Módulos de deformabilidade das camadas betuminosas estimados e calculados a partir dos resultados dos ensaios com deflectómetro de impacto.....	168
Quadro 5.1 – Resumo dos ensaios de desempenho realizados em laboratório.....	173
Quadro 5.2 – Resumo dos resultados da extensão média, número de ciclos na rotura, obtidos nos ensaios de fadiga da mistura D2.....	180
Quadro 5.3 – Resumo dos parâmetros admitindo a relação $E_m = E_0 e^{b \cdot N}$, e número de ciclos de carga correspondente a redução de 50% do módulo de deformabilidade (mistura D2).....	182
Quadro 5.4 – Resumo da aplicação do método da energia dissipada adaptado, aos resultados da mistura D2, para reduções do módulo de deformabilidade de 30, 50 e 70%	188
Quadro 5.5 – Módulos de deformabilidade e ângulos de fase das misturas MBTE, medidos a 15°C	196
Quadro 5.6 – Módulos de deformabilidade e ângulos de fase das misturas MBTE, medidos a 25°C	197
Quadro 5.7 – Módulos de deformabilidade e ângulos de fase das misturas MBTE, medidos a 40°C	197
Quadro 5.8 – Resumo da média, desvios padrões e coeficientes de variação (%), dos módulos de deformabilidade e dos ângulos de fase de todas as misturas MBTE.....	200
Quadro 5.9 – Parâmetros das leis do tipo $E_{mi} = A (E_{m10})^B$ das misturas MBTE, que relacionam os módulos E_{m5} e E_{m1} com o módulo de deformabilidade a 10 Hz (E_{m10})	201

Quadro 5.10 – Parâmetros das leis do tipo $E_m = A (E_m25)^B$ das misturas MBTE, que relacionam os módulos E_{m15} e E_{m40} com o módulo de deformabilidade a 25°C (E_{m25}).....	202
Quadro 5.11 – Parâmetros de ajuste da relação linear entre o módulo de deformabilidade das misturas MBTE e o ângulo de fase.....	202
Quadro 5.12 – Parâmetros das leis de fadiga das misturas MBTE e extensão de tracção necessária para que haja rotura do material ao fim de 1 milhão de ciclos.....	206
Quadro 5.13 – Resumo dos resultados dos ensaios de compressão uniaxial de cargas repetidas com as misturas MBTE.....	209
Quadro 5.14 – Resumo dos resultados obtidos nos ensaios de compressão triaxial de cargas repetidas com as misturas MBTE.....	213
Quadro 5.15 – Valores observados no ensaio com simulador de tráfego: deformação permanente, velocidade de deformação (V_{def}).....	216
Quadro 5.16 – Resumo da avaliação qualitativa do desempenho das misturas MBTE.....	219
Quadro 5.17 – Resumo dos indicadores de desempenho das misturas MBTE.....	220
Quadro 5.18 – Módulos de deformabilidade e ângulos de fase das misturas MBLB, medidos a 15°C.....	221
Quadro 5.19 – Módulos de deformabilidade e ângulos de fase das misturas MBLB, medidos a 25°C.....	222
Quadro 5.20 – Módulos de deformabilidade e ângulos de fase das misturas MBLB, medidos a 40°C.....	222
Quadro 5.21 – Resumo da estimativa da penetração do ligante final das misturas MBLB.....	224
Quadro 5.22 – Parâmetros das leis do tipo $E_m = A (E_{m10})^B$ das misturas MBLB, que relacionam os módulos E_{m5} e E_{m1} com o módulo de deformabilidade a 10 Hz (E_{m10}).....	226
Quadro 5.23 – Parâmetros de ajuste da relação linear entre o módulo de deformabilidade e o ângulo de fase... 226	226
Quadro 5.24 – Parâmetros das leis de fadiga das misturas MBLB e extensão de tracção necessária correspondente a um milhão de ciclos.....	229
Quadro 5.25 – Resumo dos resultados das misturas MBLB, obtidos nos ensaios de compressão uniaxial de cargas repetidas.....	231
Quadro 5.26 – Resumo dos indicadores de desempenho das misturas MBLB.....	232
Quadro 5.27 – Módulos de deformabilidade e ângulos de fase das misturas BDLB.....	233
Quadro 5.28 – Parâmetros de ajuste da relação linear entre o módulo de deformabilidade e o ângulo de fase... 235	235
Quadro 5.29 – Parâmetros das leis de fadiga das misturas BDLB e extensão correspondente a um milhão de ciclos.....	237
Quadro 5.30 – Resumo dos resultados obtidos com as misturas BDLB, em ensaios de compressão uniaxial de cargas repetidas.....	238
Quadro 5.31 – Resumo dos indicadores de desempenho das misturas BDLB.....	239
Quadro 6.1 – Propriedades do material fresado e componentes a determinar e respectivas normas de ensaio (adaptado de LNEC, 2006).....	248
Quadro 6.2 – Campo de aplicação e taxas de reciclagem máximas (LNEC, 2006).....	250
Quadro 6.3 – Taxa de reciclagem (TR) máxima em função do tipo de central de fabrico.....	256
Quadro 6.4 – Valores máximos da taxa de reciclagem (Adaptado de Bragança e Pires, 2006).....	256
Quadro 6.5 – Estimativa da temperatura de aquecimento dos agregados para temperatura final da mistura de 150°C e sendo o material fresado introduzido a frio (20°C).....	257
Quadro 6.6 – Estimativa da temperatura de aquecimento dos agregados para temperatura final da mistura de 150°C e sendo o material fresado introduzido a quente.....	257
Quadro 6.7 – Espessuras de reforço e profundidades de fresagem consideradas na análise.....	260
Quadro 6.8 – Soluções de reabilitação com camada de desgaste em betão betuminoso.....	261
Quadro 6.9 – Soluções de reabilitação com camada de desgaste em betão betuminoso drenante.....	262
Quadro 6.10 – Previsão das quantidades de material fresado e dos custos de fresagem e transporte do material fresado.....	262

Quadro 6.11 – Custos unitários das misturas consideradas na análise	263
Quadro 6.12 – Custos de execução das soluções de reabilitação	263
Quadro 6.13 – Redução de custos de execução das alternativas com reciclagem a quente.....	263
Quadro 6.14 – Custos globais das soluções de reabilitação	264
Quadro 6.15 – Redução de custos globais das alternativas com reciclagem a quente.....	264
Quadro 6.16 – Proporção de material fresado reciclado e não reciclado	265
Quadro 6.17 – Resumo das quantidades de misturas recicladas e de material fresado da obra de “beneficiação/reforço no sublanço Pombal/Condeixa da A1.” (Bragança e Pires, 2006).....	265
Quadro 6.18 – Redução de custos de execução (%) proporcionados pela reciclagem a quente em central (Kandhal e Mallick, 1997)	266
Quadro I.1 – Misturas de macadame betuminoso aplicadas nos trechos experimentais.....	273
Quadro I.2 – Características gerais das vigas de macadame betuminoso, provenientes dos trechos experimentais (Mistura A1)	274
Quadro I.3 – Características gerais das vigas de macadame betuminoso, provenientes dos trechos experimentais (Mistura A2)	274
Quadro I.4 – Características gerais das vigas de macadame betuminoso, provenientes dos trechos experimentais (Mistura A3)	274
Quadro I.5 – Características gerais das vigas de macadame betuminoso, provenientes dos trechos experimentais (Mistura B1)	275
Quadro I.6 – Características gerais das vigas de macadame betuminoso, provenientes dos trechos experimentais (Mistura B2)	275
Quadro I.7 – Características gerais das vigas de macadame betuminoso, provenientes dos trechos experimentais (Mistura B3)	275
Quadro I.8 – Características gerais das vigas de macadame betuminoso, provenientes dos trechos experimentais (Mistura C1)	276
Quadro I.9 – Características gerais das vigas de macadame betuminoso, provenientes dos trechos experimentais (Mistura C2)	276
Quadro I.10 – Características gerais das vigas de macadame betuminoso, provenientes dos trechos experimentais (Mistura C3)	276
Quadro I.11 – Características gerais das vigas de macadame betuminoso, provenientes dos trechos experimentais (Mistura D1)	277
Quadro I.12 – Características gerais das vigas de macadame betuminoso, provenientes dos trechos experimentais (Mistura D2)	277
Quadro I.13 – Características gerais das vigas de macadame betuminoso, provenientes dos trechos experimentais (Mistura D3)	277
Quadro I.14 – Características gerais dos provetes cilíndricos de macadame betuminoso, provenientes dos trechos experimentais (Mistura A1).....	278
Quadro I.15 – Características gerais dos provetes cilíndricos de macadame betuminoso, provenientes dos trechos experimentais (Mistura A2).....	278
Quadro I.16 – Características gerais dos provetes cilíndricos de macadame betuminoso, provenientes dos trechos experimentais (Mistura A3).....	278
Quadro I.17 – Características gerais dos provetes cilíndricos de macadame betuminoso, provenientes dos trechos experimentais (Mistura B1).....	279
Quadro I.18 – Características gerais dos provetes cilíndricos de macadame betuminoso, provenientes dos trechos experimentais (Mistura B2).....	279
Quadro I.19 – Características gerais dos provetes cilíndricos de macadame betuminoso, provenientes dos trechos experimentais (Mistura B3).....	279

Quadro I.20 – Características gerais dos provetes cilíndricos de macadame betuminoso, provenientes dos trechos experimentais (Mistura C1)	280
Quadro I.21 – Características gerais dos provetes cilíndricos de macadame betuminoso, provenientes dos trechos experimentais (Mistura C2)	280
Quadro I.22 – Características gerais dos provetes cilíndricos de macadame betuminoso, provenientes dos trechos experimentais (Mistura C3)	280
Quadro I.23 – Características gerais dos provetes cilíndricos de macadame betuminoso, provenientes dos trechos experimentais (Mistura D1)	281
Quadro I.24 – Características gerais dos provetes cilíndricos de macadame betuminoso, provenientes dos trechos experimentais (Mistura D2)	281
Quadro I.25 – Características gerais dos provetes cilíndricos de macadame betuminoso, provenientes dos trechos experimentais (Mistura D3)	281
Quadro I.26 – Características gerais das lajes de macadame betuminoso, provenientes dos trechos experimentais, usadas nos ensaios com simulador de tráfego (Misturas A1, A2 e A3)	282
Quadro I.27 – Características gerais das lajes de macadame betuminoso, provenientes dos trechos experimentais, usadas nos ensaios com simulador de tráfego (Misturas B1, B2 e B3).....	282
Quadro I.28 – Características gerais das lajes de macadame betuminoso, provenientes dos trechos experimentais, usadas nos ensaios com simulador de tráfego (Misturas C1, C2 e C3).....	282
Quadro I.29 – Características gerais das lajes de macadame betuminoso, provenientes dos trechos experimentais, usadas nos ensaios com simulador de tráfego (Misturas D1, D2 e D3)	283
Quadro I.30 – Módulos de deformabilidade e ângulos de fase da mistura A1	283
Quadro I.31 – Módulos de deformabilidade e ângulos de fase da mistura A2	284
Quadro I.32 – Módulos de deformabilidade e ângulos de fase da mistura A3	285
Quadro I.33 – Módulos de deformabilidade e ângulos de fase da mistura B1.....	285
Quadro I.34 – Módulos de deformabilidade e ângulos de fase da mistura B2.....	286
Quadro I.35 – Módulos de deformabilidade e ângulos de fase da mistura B3.....	287
Quadro I.36 – Módulos de deformabilidade e ângulos de fase da mistura C1.....	287
Quadro I.37 – Módulos de deformabilidade e ângulos de fase da mistura C2.....	288
Quadro I.38 – Módulos de deformabilidade e ângulos de fase da mistura C3.....	289
Quadro I.39 – Módulos de deformabilidade e ângulos de fase da mistura D1	289
Quadro I.40 – Módulos de deformabilidade e ângulos de fase da mistura D2	290
Quadro I.41 – Módulos de deformabilidade e ângulos de fase da mistura D3	291
Quadro I.42 – Resumo da média dos módulos de deformabilidade e dos ângulos de fase das misturas provenientes dos trechos experimentais (temperatura de 15 °C).....	291
Quadro I.43 – Resumo da média dos módulos de deformabilidade e dos ângulos de fase das misturas provenientes dos trechos experimentais (temperatura de 25 °C).....	292
Quadro I.44 – Resumo da média dos módulos de deformabilidade e dos ângulos de fase das misturas provenientes dos trechos experimentais (temperatura de 40 °C).....	292
Quadro I.45 – Resumo dos parâmetros das leis de fadiga das misturas aplicadas nos trechos experimentais e extensão correspondente a um milhão de ciclos (ϵ_6).....	297
Quadro I.46 – Resumo dos resultados obtidos nos ensaios de compressão uniaxial cíclicos com as misturas de macadame betuminoso aplicadas nos trechos experimentais	310
Quadro I.47 – Resumo dos resultados obtidos nos ensaios de compressão triaxial cíclicos com as misturas de macadame betuminoso aplicadas nos trechos experimentais	310
Quadro I.48 – Resumo dos resultados obtidos nos ensaios com simulador de tráfego com as misturas de macadame betuminoso aplicadas nos trechos experimentais	310
Quadro II.1 – Misturas de macadame betuminoso produzidas e compactadas em laboratório.....	311

Quadro II.2 – Características gerais das vigas de macadame betuminoso, compactadas em laboratório, usadas nos ensaios de flexão de cargas repetidas (Mistura LA)	312
Quadro II.3 – Características gerais das vigas de macadame betuminoso, compactadas em laboratório, usadas nos ensaios de flexão de cargas repetidas (Mistura LB).....	312
Quadro II.4 – Características gerais das vigas de macadame betuminoso, compactadas em laboratório, usadas nos ensaios de flexão de cargas repetidas (Mistura LC).....	312
Quadro II.5 – Características gerais das vigas de macadame betuminoso, compactadas em laboratório, usadas nos ensaios de flexão de cargas repetidas (Mistura LD)	313
Quadro II.6 – Características gerais das vigas de macadame betuminoso, compactadas em laboratório, usadas nos ensaios de flexão de cargas repetidas (Mistura LE).....	313
Quadro II.7 – Características gerais das vigas de macadame betuminoso, compactadas em laboratório, usadas nos ensaios de flexão de cargas repetidas (Mistura LF)	313
Quadro II.8 – Características gerais das vigas de macadame betuminoso, compactadas em laboratório, usadas nos ensaios de flexão de cargas repetidas (Mistura LG)	314
Quadro II.9 – Características gerais das vigas de macadame betuminoso, compactadas em laboratório, usadas nos ensaios de flexão de cargas repetidas (Mistura LH)	314
Quadro II.10 – Características gerais dos provetes cilíndricos de macadame betuminoso, compactados em laboratório e usados nos ensaios de compressão uniaxial (Misturas LA e LB)	314
Quadro II.11 – Características gerais dos provetes cilíndricos de macadame betuminoso, compactados em laboratório e usados nos ensaios de compressão uniaxial (Misturas LC e LD)	315
Quadro II.12 – Características gerais dos provetes cilíndricos de macadame betuminoso, compactados em laboratório e usados nos ensaios de compressão uniaxial (Misturas LE e LF)	315
Quadro II.13 – Características gerais dos provetes cilíndricos de macadame betuminoso, compactados em laboratório e usados nos ensaios de compressão uniaxial (Misturas LG e LH)	315
Quadro II.14 – Módulos de deformabilidade e ângulos de fase da mistura LA	316
Quadro II.15 – Módulos de deformabilidade e ângulos de fase da mistura LB.....	317
Quadro II.16 – Módulos de deformabilidade e ângulos de fase da mistura LC.....	317
Quadro II.17 – Módulos de deformabilidade e ângulos de fase da mistura LD	318
Quadro II.18 – Módulos de deformabilidade e ângulos de fase da mistura LE.....	319
Quadro II.19 – Módulos de deformabilidade e ângulos de fase da mistura LF.....	319
Quadro II.20 – Módulos de deformabilidade e ângulos de fase da mistura LG	320
Quadro II.21 – Módulos de deformabilidade e ângulos de fase da mistura LH	321
Quadro II.22 – Resumo da média dos módulos de deformabilidade e dos ângulos de fase das misturas de macadame betuminoso produzidas em laboratório (Temperatura de 15 °C).....	321
Quadro II.23 – Resumo da média dos módulos de deformabilidade e dos ângulos de fase das misturas de macadame betuminoso produzidas em laboratório (Temperatura de 25 °C).....	322
Quadro II.24 – Resumo da média dos módulos de deformabilidade e dos ângulos de fase das misturas de macadame betuminoso produzidas em laboratório (Temperatura de 40 °C).....	322
Quadro II.25 – Resumo dos parâmetros das leis de fadiga das misturas de macadame betuminoso produzidas em laboratório e extensão correspondente a um milhão de ciclos (ϵ_6).....	325
Quadro II.26 – Resumo dos resultados obtidos nos ensaios de compressão uniaxial cíclicos com as misturas de macadame betuminoso produzidas em laboratório	328
Quadro III.1 – Misturas de betão betuminoso produzidas e compactadas em laboratório	329
Quadro III.2 – Características gerais das vigas de betão betuminoso, compactadas em laboratório, usadas nos ensaios de flexão de cargas repetidas (Mistura M1)	329
Quadro III.3 – Características gerais das vigas de betão betuminoso, compactadas em laboratório e usadas nos ensaios de flexão de cargas repetidas (Mistura M2).....	330

Quadro III.4 – Características gerais das vigas de betão betuminoso, compactadas em laboratório e usadas nos ensaios de flexão de cargas repetidas (Mistura R1).....	330
Quadro III.5 – Características gerais das vigas de betão betuminoso, compactadas em laboratório e usadas nos ensaios de flexão de cargas repetida (Mistura R2)	330
Quadro III.6 – Características gerais dos provetes cilíndricos de betão betuminoso, compactados em laboratório e usados nos ensaios de compressão uniaxial (Rectificados).....	331
Quadro III.7 – Características gerais dos provetes cilíndricos de betão betuminoso, compactados em laboratório e usados nos ensaios de compressão uniaxial (colados)	331
Quadro III.8 – Módulos de deformabilidade e ângulos de fase da mistura M1	332
Quadro III.9 – Módulos de deformabilidade e ângulos de fase da mistura M2	333
Quadro III.10 – Módulos de deformabilidade e ângulos de fase da mistura R1	333
Quadro III.11 – Módulos de deformabilidade e ângulos de fase da mistura R2	334
Quadro III.12 – Resumo dos módulos de deformabilidade e dos ângulos de fase das misturas de betão betuminoso produzidas em laboratório	335
Quadro III.13 – Resumo dos parâmetros das leis de fadiga das misturas de betão betuminoso produzidas em laboratório e extensão correspondente a um milhão de ciclos (ϵ_6).....	337
Quadro III.14 – Resumo dos resultados obtidos nos ensaios de compressão uniaxial cíclicos sobre as misturas de betão betuminoso produzidas e compactadas em laboratório	339

SIMBOLOGIA E ABREVIATURAS

2PB-PR – *two-point bending test on prismatic shaped specimens*

2PB-TR – *two-point bending test on trapezoidal specimens*

3PB-PR – *three-point bending test on prismatic shaped specimens*

4PB-PR – *four-point bending test on prismatic specimens*

A – coeficiente

a – proporção ponderal de elementos de dimensão superior a 2,36 mm

A1, A2, A3 – misturas de macadame betuminoso aplicadas nos trechos experimentais

AFNOR – *Association Française de Normalisation*

AGEC – agregado de granulometria extensa tratado com cimento

AIPCR/PIARC – *Association Mondiale de la Route/World Road Association*

APORBET – Associação Portuguesa de Fabricantes de Misturas Betuminosas

ASTM – *American Society for Testing and Materials*

B – coeficiente

b – base de provete prismático (viga); constante; proporção ponderal de elementos de dimensão compreendida entre 0,075 mm e 2,36 mm

B1, B2, B3 – misturas de macadame betuminoso recicladas a quente com 20% de material fresado e aplicadas nos trechos experimentais

BB-FN – composição granulométrica fina de betão betuminoso

BB-GR – composição granulométrica grossa de betão betuminoso

BBR – *Bending Beam Rheometer*

BD – betão betuminoso

BDD – betão betuminoso drenante

BDLB – betão betuminoso produzido e compactado em laboratório

BD_R – betão betuminoso reciclado

Bm – baridade da mistura ou massa volúmica da mistura

BMB – betume modificado com borracha

BR-FN – composição granulométrica fina de betão betuminoso reciclado a quente

BR-GR – composição granulométrica grossa de betão betuminoso reciclado a quente

BS – *British Standard*

Bt – baridade máxima teórica ou massa volúmica máxima da mistura

C – factor de forma; constante

c – calor específico (símbolo genérico); constante

C1, C2, C3 – misturas de macadame betuminoso recicladas a quente com 30% de material fresado e aplicadas nos trechos experimentais

c_a – calor específico do agregado

c_b – calor específico do betume

CD_{DP} – coeficiente de ponderação do comportamento à deformação permanente

CD_{FD} – coeficiente de ponderação do comportamento à fadiga

CEEP – caderno de encargos-tipo da Estradas de Portugal

CEN – *European Committee for Standardization*

- c_f – calor específico do filer
 c_F – calor específico do material fresado
 c_h – calor específico da água
 c_i – calor específico do corpo i
CRP – Centro Rodoviário Português
CRR – *Centre de Recherches Routières*
D1, D2, D3 – misturas de macadame betuminoso recicladas a quente com 40% de material fresado e aplicadas nos trechos experimentais
DEC – Departamento de Engenharia Civil
DGC – *Dirección General de Carreteras*
 D_{max} – dimensão máxima do agregado
 dQ – diferença de calor
DSR – *Dynamic Shear Rheometer*
 dT – diferença de temperatura
DTC-CY – *direct tension-compression test on cylindrical specimens*
DT-CY – *test applying direct tension to cylindrical specimens*
DT-PR – *test applying direct tension to prismatic specimens*
DTT – *direct tension test*
 E^* – módulo complexo (símbolo genérico)
 E_0 – módulo de deformabilidade inicial; constante
 E_1 – componente elástica ou real do módulo de deformabilidade
 E_2 – componente viscosa ou imaginária do módulo de deformabilidade
EA1A – estrutura alternativa 1A
EA1B – estrutura alternativa 1B
EA2 – estrutura alternativa 2
EAPA – *European Asphalt Pavement Association*
 E_m – módulo de deformabilidade de mistura betuminosa
Em1 – módulo de deformabilidade de mistura betuminosa medido a 1 Hz
Em10 – módulo de deformabilidade de mistura betuminosa medido a 10 Hz
Em13 – módulo de deformabilidade de mistura betuminosa a 13 °C
Em15 – módulo de deformabilidade de mistura betuminosa a 15 °C
Em25 – módulo de deformabilidade de mistura betuminosa a 25 °C
Em40 – módulo de deformabilidade de mistura betuminosa a 40 °C
Em5 – módulo de deformabilidade de mistura betuminosa medido a 5 Hz
 E_{m_i} – módulo de deformabilidade de mistura betuminosa no ciclo i
EN – Norma Europeia; Estrada nacional
EP – Estradas de Portugal
 E_r – módulo resiliente
ET1 – estrutura tradicional 1
ET2 – estrutura tradicional 2
EUA – Estados Unidos da América
 F – constante; força (símbolo genérico)
 f – frequência de carregamento ou de ensaio
F1 – classe de material fresado
F5 – classe de material fresado
FCTUC - Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra
Fdec – classe de material fresado
FHWA – *Federal Highway Administration*
-

-
- f_R** – frequência reduzida
FWD – *Falling Weight Deflectometer*
G* – módulo complexo do betume
G₁ – componente elástica do módulo complexo do betume
G₂ – componente viscosa do módulo complexo do betume
GC – grau de compactação
h – humidade do material fresado
h₀ – altura inicial de provete
h_{fres} – profundidade de fresagem
h_i – altura do provete i
h_N – altura do provete no ciclo N
h_{ref} – espessura de reforço
IC – itinerário complementar
ID – indicador de desempenho global
ID_{DP} – indicador de desempenho à deformação permanente
ID_{FD} – indicador de desempenho à fadiga
IP – itinerário principal
IPQ – Instituto Português da Qualidade
IT-IC – *indirect tensile test on cylindrical specimens*
JAЕ – Junta Autónoma de Estradas
K – módulo de riqueza em betume
K₁ – constante
K₂ – constante
K₂₅ – factor de correcção do módulo de deformabilidade
L – vão em ensaio de flexão de cargas repetidas; peso aplicado pela roda no ensaio com simulador de tráfego
LA – mistura de macadame betuminoso produzida e compactada em laboratório
LB – mistura de macadame betuminoso reciclada a quente com 20% de material fresado, betume 35/50, produzida e compactada em laboratório
LC – mistura de macadame betuminoso reciclada a quente com 30% de material fresado, betume 35/50, produzida e compactada em laboratório
LCPC – *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*
LD – mistura de macadame betuminoso reciclada a quente com 40% de material fresado, betume 35/50, produzida e compactada em laboratório
LE – mistura de macadame betuminoso reciclada a quente com 30% de material fresado, betume 50/70, produzida e compactada em laboratório
LF – mistura de macadame betuminoso reciclada a quente com 40% de material fresado, betume 50/70, produzida e compactada em laboratório
LG – mistura de macadame betuminoso reciclada a quente com 30% de material fresado, betume 70/100, produzida e compactada em laboratório
LH – mistura de macadame betuminoso reciclada a quente com 40% de material fresado, betume 70/100, produzida e compactada em laboratório
LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil
LNEC E – Especificação do Laboratório Nacional de Engenharia Civil
l_v – calor de vaporização da água
LVDT – *linear variable differential transducer*
m – massa (símbolo genérico); constante
M1, M2 – misturas de betão betuminoso produzidas e compactada em laboratório
m_a – massa de agregado
-

MACOPAV – Manual de Concepção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional

ma_F – massa de agregado do material fresado

ma_N – massa de agregado novo na mistura reciclada

ma_R – massa de agregado da mistura reciclada

MB – macadame betuminoso

mb – massa de betume

MBD – mistura betuminosa densa

MBD_R – mistura betuminosa densa reciclada

mb_F – massa de betume (envelhecido) do material fresado

MBLB – macadame betuminoso produzido e compactado em Laboratório

mb_N – massa de betume novo na mistura reciclada

MBQ – mistura betuminosa a quente

MB_R – macadame betuminoso reciclado

mb_R – massa de betume (ligante total) da mistura reciclada

MBR – mistura betuminosa reciclada

MBRQ – mistura betuminosa reciclada a quente

MBTE – macadame betuminoso aplicado nos trechos experimentais

m_F – massa de material fresado

m_h – massa de água

m_i – massa do corpo i

mt – massa total da mistura

mt_F – massa total de material fresado

mt_R – massa total da mistura reciclada

N – número de aplicações de carga; número de ciclos de carga até atingir a rotura em ensaio de fadiga;

n – porosidade

N₈₀ – número acumulado de eixos padrão de 80 kN

NAPA – *National Asphalt Pavement Association*

NP – Norma Portuguesa

Nr_{dim} – número de rotações de dimensionamento

Nr_{ini} – número de rotações inicial

Nr_{max} – número de rotações máximo

P₁₅ – classe de ligante recuperado de material fresado

p₂₀₀ – percentagem de material passado no peneiro n.º 200 ou proporção ponderal de elementos de dimensão inferior a 0,075 mm

pa – percentagem de agregado

pa_F – percentagem de agregado do material fresado

pa_N – percentagem de agregado novo na mistura reciclada

pa_R – percentagem de agregado da mistura reciclada

PAV – *Pressure Ageing Vessel*

pb – percentagem de betume

pb_{est} – percentagem de betume estimada

pb_F – percentagem de betume (ligante envelhecido) do material fresado

pb_N – percentagem de betume novo na mistura reciclada

pb_R – percentagem de betume (ligante total) da mistura reciclada

PCG – prensa de corte giratória

Pdec – classe de ligante recuperado de material fresado

pen_F – penetração do betume recuperado do material fresado, determinada a 25°C

pen_N – penetração do betume novo, determinada a 25°C

-
- pen_R** – penetração do betume (ligante total) de mistura reciclada, determinada a 25°C
- PG** – *performance grade*
- PIARC/AIPCR** – *World Road Association/Association Mondiale de la Route*
- prEN** – pré-Norma Europeia
- PRN 85** – Plano Rodoviário Nacional de 1985
- Q** – calor (símbolo genérico)
- Q_h** – calor recebido pela água
- Q_i** – calor cedido ou recebido pelo corpo i
- R** – relação entre a massa de material fresado e a massa de agregados novos; constante universal dos gases ideais
- R1, R2** – misturas de betão betuminoso recicladas a quente com 30% de material fresado
- RA** – *reclaimed asphalt*
- RAP** – *reclaimed asphalt pavement*
- Rb** – proporção de ligante novo no ligante final da mistura reciclada
- Rfb** – relação ponderal filer/betume
- RILEM** – *Réunion Internationale des Laboratoires d'Essais et de Recherches sur les Matériaux et les Constructions*
- Rm** – redução do módulo de deformabilidade em ensaio de fadiga
- rpm** – número de rotações por minuto
- RTFOT** – *rolling thin film oven test*
- S₁** – proporção ponderal de elementos de dimensão superior a 6,3 mm
- S₂** – proporção ponderal de elementos de dimensão compreendida entre 0,315 mm e 6,3 mm
- S₃** – proporção ponderal de elementos de dimensão compreendida entre 0,075 mm e 0,315 mm
- S₇₀** – classe de ligante recuperado de material fresado
- SAMI** – *stress absorbing membrane interlayer*
- Sb** – grau de saturação em betume
- SCUT** – sem cobrança ao utilizador
- Sdec** – classe de ligante recuperado de material fresado
- SHRP** – *Strategic Highway Research Program*
- S_N** – módulo de fluência (*Creep modulus*)
- Superpave** – *Superior Performing Asphalt Pavements*
- SWOT** – *Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats*
- T** – temperatura (símbolo genérico)
- T'** – temperatura dum sistema isolado sem perdas de calor
- t** – tempo (símbolo genérico)
- T_a** – temperatura do agregado
- Tab** – temperatura de amolecimento de um betume determinada pelo método do anel e bola
- Tab_F** – temperatura de amolecimento anel e bola do betume recuperado do material fresado
- Tab_N** – temperatura de amolecimento anel e bola do betume novo
- Tab_R** – temperatura de amolecimento do ligante final da mistura reciclada
- T_b** – temperatura do betume
- tb** – teor em betume
- Tc** – temperatura crítica
- tc** – tempo de carregamento
- Tc_{alta}** – temperatura crítica alta
- Tc_{baixa}** – temperatura crítica baixa
- Tc_F** – temperatura crítica (alta, média ou baixa) do ligante recuperado do material fresado
- Tc_{med}** – temperatura crítica média
- Tc_N** – temperatura crítica (alta, média ou baixa) do betume novo
-

T_{cR} – temperatura crítica (alta, média ou baixa) do ligante final da mistura reciclada
T_f – temperatura do filer
T_F – temperatura do material fresado
TFOT – *thin film oven test*
T_h – temperatura da água
T_i – temperatura do corpo i
T_{int} – temperatura intermédia
T_m – temperatura de uma mistura betuminosa
T'_m – temperatura final duma mistura betuminosa (sem perdas de calor)
TR – taxa de reciclagem
TRa – taxa de reciclagem de agregado
TRb – taxa de reciclagem de betume
T_{REF} – temperatura de referência
TRRL – *Transportation Road Research Laboratory*
TSM – tambor-secador-misturador
TVB – teor volumétrico de betume ou percentagem volumétrica de betume
T_x – temperatura alta
T_y – temperatura baixa
UE – União Europeia
UM – Universidade do Minho
USFC – Universidade Federal de Santa Catarina do Brasil
V – velocidade média da corrente de tráfego
va – percentagem volumétrica de agregado
Va – volume de agregado
Va_R – volume de agregado da mistura reciclada
Vb – volume de betume
Vb_R – volume de ligante (total) da mistura reciclada
Vdef – velocidade de deformação
Vdef₃₀₋₄₅ – velocidade de deformação no ensaio com simulador de tráfego
Visc_F – viscosidade do betume recuperado do material fresado
Visc_N – viscosidade do betume novo
Visc_R – viscosidade do ligante final da mistura reciclada
VMA – volume de vazios no esqueleto de agregado
VMA_R – volume de vazios no esqueleto de agregado de mistura reciclada
Vt – volume total
Vt_R – volume total de mistura reciclada
Vv – volume de vazios
Vv_R – volume de vazios de mistura reciclada
W – largura do pneu no ensaio com simulador de tráfego
W_i – energia dissipada por unidade de volume no ciclo i
Wt – energia dissipada acumulada
Wt_n – energia dissipada acumulada até ao ciclo n
WTR – velocidade de deformação média
ΔF – amplitude da carga
ΔH – energia de activação aparente
Δh_N – deformação axial do provete no ciclo N
ΔQ – variação de calor
ΔT – variação de temperatura

-
- ΔT_a – factor de correcção da temperatura de aquecimento dos agregados devido às perdas de calor
 ΔT_m – factor de correcção da temperatura da mistura devido às perdas de calor
 $\Delta \delta$ – amplitude do deslocamento
 α_T – parâmetro
 δ – ângulo de fase de um betume
 ε – extensão (símbolo genérico)
 $\varepsilon(t)$ – extensão no instante t
 ε_0 – amplitude da extensão num ciclo de carga
 $\varepsilon_{1000, calc}$ – deformação permanente calculada ao fim de 1000 ciclos de carga
 ε_6 – extensão de tracção necessária para que haja rotura do material ao fim de um milhão de ciclos de carga
 ε_i – amplitude da extensão aplicada no ciclo i
 ε_N – extensão axial permanente
 ε_t – extensão de tracção
 ϕ – ângulo de fase
 ϕ_i – ângulo de fase no ciclo i
 ϕ_{med} – ângulo de fase médio ao longo de ensaio de fadiga
 ρ_a – massa volúmica do agregado
 ρ_b – massa volúmica do betume
 $\sigma(t)$ – tensão no instante t
 σ_d – tensão desviante ou deviatória
 σ_i – amplitude da tensão aplicada no ciclo i
 σ_{PC} – tensão de pré-carregamento
 σ_v – tensão vertical
 σ – tensão (símbolo genérico)
 σ_0 – amplitude de tensão num ciclo de carga
 σ_1 – tensão máxima
 σ_3 – tensão de confinamento
 τ – tensão tangencial
 ω – frequência angular de carregamento

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

A grande extensão e a deficiente qualidade da rede rodoviária nacional constituíram, durante muitos anos, um factor desfavorável ao desenvolvimento sócio-económico de Portugal, não restando dúvidas de que a implementação do Plano Rodoviário Nacional de 1985 (PRN 85) contribuiu em grande medida para o desenvolvimento observado em Portugal desde a adesão à União Europeia (UE).

As estradas desempenham assim um papel fundamental no desenvolvimento de qualquer país, podendo dizer-se que a rede rodoviária está para um país como o sistema de vasos sanguíneos está para o corpo humano. De facto, é a rede rodoviária que assegura, em grande parte, o transporte de pessoas e mercadorias de e para qualquer parte do território. Por essa razão, as estradas, desde as grandes vias estruturantes, da rede rodoviária nacional, até às estradas de nível municipal, devem encontrar-se em bom estado de conservação.

Os pavimentos rodoviários, por constituírem a estrutura de suporte do tráfego rodoviário, devem satisfazer, ao longo da sua vida útil, determinados níveis mínimos de qualidade estrutural e funcional. Porém, o aumento do tráfego pesado e da carga transportada (total e por eixo), observado desde a década de 1990 em Portugal e nos restantes países da UE, levou a indesejados níveis de deterioração dos pavimentos rodoviários e, em consequência, ao incumprimento dos referidos patamares de exigência estrutural e funcional.

Na década de 1990, registou-se no nosso país um forte incremento do investimento na construção rodoviária. Um bom indicador desse crescimento é a evolução do consumo anual de betume asfáltico ao longo desse período e que se ilustra na Figura 1.1. Existe alguma informação sobre a quantidade de misturas betuminosas fabricadas a quente aplicadas em Portugal, mas apenas desde 1996. Seguindo o critério da Associação Portuguesa de Fabricantes de Misturas Betuminosas (APORBET, 2002), admitindo que o fabrico de misturas betuminosas a quente (MBQ) absorva cerca de 70% a 75% do total de betumes consumidos, para uma percentagem média de betume da ordem dos 5,0%, pode dizer-se que a uma tonelada de betume correspondem cerca de 15 toneladas de MBQ.

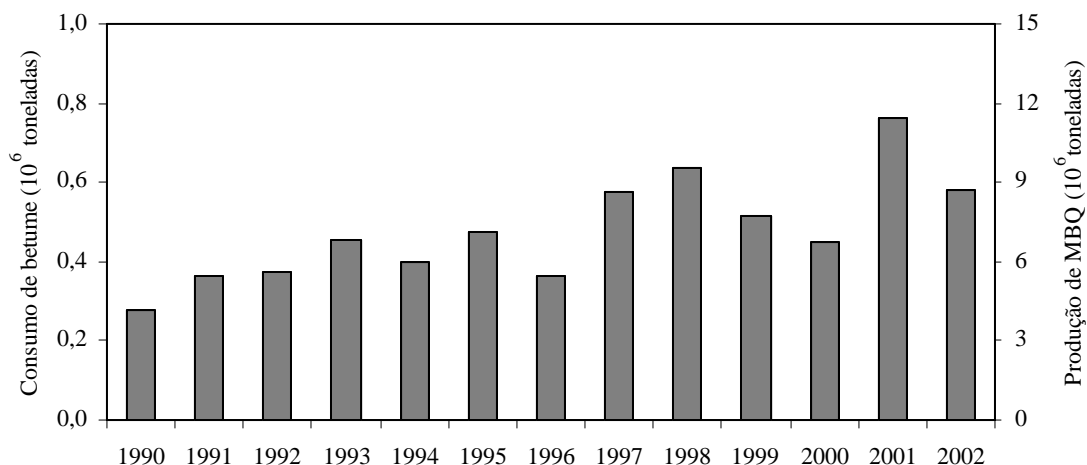


Figura 1.1 – Evolução do consumo de betume em Portugal (APORBET, 1998 e 2002) e correspondente estimativa da produção de misturas betuminosas fabricadas a quente

Verificou-se igualmente um crescimento, este ainda mais significativo, das despesas com obras de conservação e beneficiação de estradas (Figura 1.2), que se traduziu num aumento do peso das obras de reabilitação e conservação relativamente às novas obras de construção rodoviária. Esta necessidade crescente de realizar obras de reabilitação dos pavimentos existentes terá também originado quantidades não desprezáveis e crescentes de materiais disponíveis para eventual reciclagem. Ora, como os pavimentos rodoviários flexíveis são a solução típica de pavimentação em Portugal, a esmagadora maioria desses materiais serão misturas envelhecidas provenientes de camadas betuminosas.

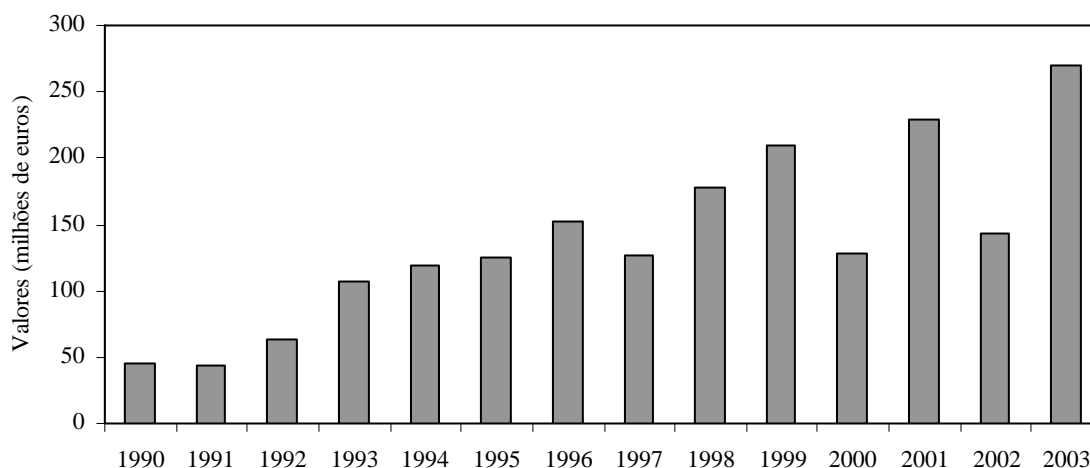


Figura 1.2 – Evolução das despesas em conservação e beneficiação de estradas (Martinho, 2004)

No nosso país, quer nas obras novas, quer nas obras de reabilitação de pavimentos, regra geral têm sido aplicados materiais novos (agregados e betume), não sendo as misturas provenientes das camadas degradadas reutilizadas nessas obras. No entanto, a reciclagem destes materiais, porque aumenta o seu ciclo de vida, é algo que tem vindo a preocupar cada vez mais os meios técnicos e as entidades rodoviárias. Aliás, reciclagem vem do inglês *recycle* (“*re*” de repetir, e “*cycle*” de ciclo), ou seja, repetir o ciclo de vida.

A reciclagem é uma das soluções possíveis para a reabilitação de pavimentos muito degradados e consiste na reutilização dos materiais provenientes dos pavimentos em serviço, que se encontram deteriorados, tendo perdido grande parte das suas propriedades iniciais, ou cujas características se pretendem melhorar.

A reciclagem dos materiais dos pavimentos rodoviários surge na década de 70 nos EUA, altura em que se viveu uma das crises petrolíferas. Os preços atingidos pelo petróleo bruto nessa época, tal como hoje em dia, levaram a que as administrações do sector rodoviário tivessem em conta os custos crescentes do betume asfáltico e dos combustíveis que influenciam directamente os custos de fabrico, transporte e aplicação das misturas.

Na última década a reciclagem aparece novamente em força, mas agora mais por razões de ordem ambiental, não deixando porém a decisão de reciclar e como reciclar estar muito amarrada a factores de ordem económica. Assim, os critérios adoptados no projecto de construção ou reabilitação de pavimentos rodoviários, que no passado eram de ordem técnica e económica, no presente e no futuro deverão integrar inevitavelmente factores de ordem ambiental (Batista, 2004) e que certamente condicionarão a estrutura final.

De facto, os agregados não deixam de ser agregados e o ligante, embora envelhecido por oxidação, mais rígido e quebradiço, não deixa de poder desempenhar o seu papel em novas misturas betuminosas recicladas (MBR). Contudo, como normalmente não é possível atingir taxas de reciclagem de 100%, para que todos os materiais disponíveis com viabilidade técnica de incorporação em MBR sejam efectivamente reciclados e continuem a desempenhar função idêntica, será imperioso que as MBR sejam aplicadas não só em obras de reabilitação mas também em novas obras.

Curioso é que são essas misturas betuminosas, incorporadas em MBR, que lideram a lista de materiais reciclados na Europa, superando a sucata de ferro e representando mais do que a soma de todos os restantes materiais reciclados (Azevedo e Cardoso, 2003). Nos EUA é a reciclagem de misturas betuminosas que encabeça a lista em termos de percentagem de material reciclado (Figura 1.3).

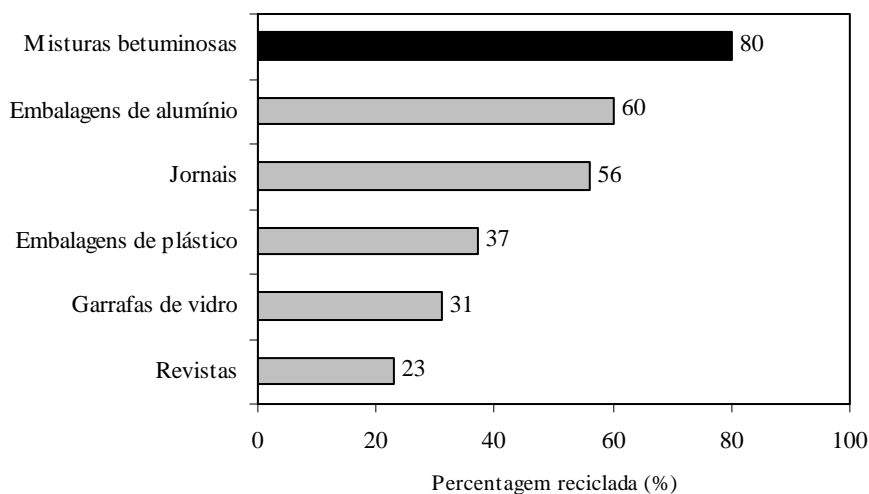


Figura 1.3 – Percentagem reciclada de alguns materiais nos EUA (NAPA, 2005)

Todavia, a realidade portuguesa é bem diferente. Martinho *et al.* (2004) identificaram apenas quinze obras rodoviárias com recurso à reciclagem das misturas betuminosas existentes. Em Portugal, são vários os destinos dados ao material fresado. O destino mais habitual passa pelo simples abandono ou depósito, não sendo feita qualquer reutilização (Figura 1.4). Outro fim consiste em utilizar o material em caminhos marginais ou secundários, públicos ou privados, destinados a tráfego sem qualquer significado e em que o material fresado funciona como base de suporte alternativa ao tradicional caminho de terra batida.



Figura 1.4 – Exemplo de depósito (com mais de cinco anos) de material proveniente de fresagem

No nosso país, foram encaradas outras hipóteses, como por exemplo a reutilização do material fresado em leito do pavimento (Miranda, 2006) ou em substituição de camada de sub-base (Moreira *et al.*, 2006). As aplicações que suportaram as soluções descritas tiveram um sucesso limitado, resultando num número reduzido de aplicações subseqüentes.

A solução mais exequível e mais utilizada para o uso do material fresado de misturas betuminosas, passa pela reutilização do material em novas misturas betuminosas recicladas. Este é o fim mais nobre e ambientalmente mais desejável para o material, porque este acaba por desempenhar uma função idêntica à anterior, não baixa o seu valor económico e mantém a sua contribuição para o desempenho da estrutura do pavimento.

No que toca às misturas betuminosas, identificam-se várias técnicas de reciclagem, mas a reciclagem a quente em central, objecto do presente trabalho, constitui uma das soluções mais adoptadas noutros países da Europa, como é o caso da Holanda, da Alemanha e da Dinamarca (EAPA, 2006), onde actualmente representa mais de 75% do total de misturas recicladas.

Nesta técnica, além dos componentes habituais, são incorporadas em central, a frio ou aquecidas e em determinada proporção, as misturas betuminosas envelhecidas provenientes da fresagem de camadas de pavimentos. Todavia, a reciclagem a quente em central, apesar de apresentar reconhecidas vantagens de ordem económica e ambiental e de ser muito utilizada e até normalizada em muitos países, tem sido pouco utilizada em Portugal.

Este atraso, que se tem verificado no nosso país relativamente à maioria dos países Europeus, deve-se em grande medida a uma certa resistência à mudança resultante de algum receio sentido pelo sector rodoviário (donos de obra, construtores e projectistas) no que respeita, tanto ao processo de fabrico, como ao desempenho das misturas quando em serviço.

1.2 Objectivos e Metodologia

Nesta matéria têm sido dados alguns passos, nomeadamente através da realização de algumas obras de reabilitação com aplicação de misturas betuminosas recicladas a quente em central (MBRQ). Este trabalho, ao centrar-se na técnica de reciclagem a quente em central, procura, acima de tudo, contribuir para a implementação da técnica em Portugal.

O objectivo central será o de analisar o comportamento mecânico das MBRQ, uma solução de pavimentação não habitual no nosso país, de modo a que no futuro possa vir a constituir uma boa alternativa em obras de reabilitação estrutural de pavimentos rodoviários.

O processo de fabrico das misturas nada tem de complexo, pelo que interessava aprofundar o estudo das características mecânicas das MBRQ e da sua aplicabilidade à realidade portuguesa. Não sendo possível estimar, com relativa segurança, o comportamento deste tipo de misturas, assume particular importância o desenvolvimento de estudos conducentes à sua caracterização mecânica.

Para isso, em colaboração com uma concessionária rodoviária, foram executados quatro trechos experimentais em macadame betuminoso, um sem incorporação de material fresado e os outros com incorporações até 40%. Realizaram-se ensaios que permitiram avaliar algumas características das MBRQ, as quais foram comparadas com as das misturas betuminosas sem incorporação de material fresado.

Também se produziram e compactaram misturas recicladas a quente em laboratório, de modo a estudar a influência da taxa de reciclagem e do tipo de betume de adição no desempenho das misturas.

A sequência dos trabalhos experimentais foi condicionada pela oportunidade de realização dos trechos experimentais, que se concretizaram logo no início de 2004, na sequência de trabalhos que já se vinham desenvolvendo desde 2002 (Picado-Santos e Baptista, 2002 e 2003).

De todo o trabalho experimental, em campo e em laboratório, esperava-se extrair orientações caracterizadoras do comportamento mecânico das MBRQ e, também, algumas regras de boa prática para garantir determinados comportamentos.

1.3 Organização do Trabalho

O trabalho é constituído por sete capítulos e três anexos, cuja organização e conteúdo se sintetizam nesta secção.

Neste primeiro capítulo introdutório, faz-se um enquadramento do tema em estudo, definem-se os principais objectivos da investigação, descreve-se a metodologia geral adoptada para alcançar as metas estabelecidas e faz-se uma síntese da organização do trabalho.

O Capítulo 2 trata essencialmente da descrição das diferentes técnicas de reciclagem de misturas betuminosas, agrupando-as em técnicas de reciclagem em central e em técnicas de reciclagem *in situ*. Na segunda parte do capítulo é dada particular atenção à técnica de reciclagem a quente em central, assunto principal do presente trabalho, não esquecendo as suas diferentes variantes de fabrico. No final, equaciona-se o equilíbrio térmico no fabrico das MBRQ e propõe-se uma lei que permite estimar a temperatura de aquecimento dos agregados de modo a conseguir obter determinada temperatura na mistura reciclada.

O Capítulo 3 centra-se no tema da formulação das MBRQ. Depois de definir os conceitos relativos à composição das misturas e às propriedades dos seus materiais constituintes, descrevem-se as propriedades fundamentais das misturas e os ensaios de desempenho que as permitem avaliar e que são essenciais à aplicação das metodologias de formulação mais

recentes. Segue-se a descrição e apreciação dos vários métodos de formulação existentes e a exposição do método de formulação de MBRQ seguido nos trabalhos experimentais. Por fim, apresenta-se um exemplo de formulação até ao estabelecimento da composição de base.

No Capítulo 4 faz-se uma descrição circunstanciada das diferentes fases dos trabalhos experimentais realizados. Justificam-se as opções tomadas no que respeita à composição das 24 misturas estudadas, verificam-se as suas características e mostra-se como se obtiveram os provetes para realizar os ensaios de desempenho. Os procedimentos de ensaio e as condições adoptadas para a sua realização também são aqui enquadrados e fundamentados.

A análise dos resultados dos ensaios de desempenho é feita no Capítulo 5. Depois de definida a metodologia de análise para cada tipo de ensaio, apresentam-se os resultados, por tipo de mistura, e faz-se a sua análise estudando a influência da composição das misturas e das condições de ensaio nas características mecânicas das misturas.

No Capítulo 6 apresenta-se um conjunto de orientações, a considerar na aplicação da técnica de reciclagem a quente em central em Portugal, no que respeita à formulação, ao fabrico, à aplicação e a ao controlo de qualidade, que são uma consequência da presente investigação e de trabalhos de outros autores desenvolvidos no mesmo âmbito. É ainda feito um estudo económico que acaba por evidenciar as vantagens da técnica de reciclagem a quente em central.

Finalmente, no Capítulo 7, faz-se uma síntese do trabalho desenvolvido, apresentam-se as suas conclusões gerais e apontam-se os caminhos para o desenvolvimento de trabalhos futuros.

Nos três anexos apresentam-se as características de todos os provetes disponíveis e os resultados dos ensaios de desempenho realizados, sendo o Anexo I referente às misturas de macadame betuminoso aplicadas nos trechos experimentais (MBTE), o Anexo II relativo às misturas de macadame betuminoso produzidas e compactadas em laboratório (MLLB) e o Anexo III referente às misturas de betão betuminoso produzidas e compactadas em laboratório (BDLB).

1.4 Referências Bibliográficas

- APORBET (2002). “Anuário 2002”. Associação Portuguesa de Fabricantes de Misturas Betuminosas, Lisboa.
- APORBET (1998). “Anuário 1998”. Associação Portuguesa de Fabricantes de Misturas Betuminosas, Lisboa.

- Azevedo, M. e Cardoso, M. (2003). “Reciclagem a Quente em Central Betuminosa”. Actas das II Jornadas Técnicas de Pavimentos Rodoviários - Reciclagem de Pavimentos. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (ISBN: 972-752-062), Porto.
- Batista, F. (2004). “Novas Técnicas de Reabilitação de Pavimentos. Misturas betuminosas densas a frio”. Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.
- EAPA (2006). “Asphalt in Figures - 2005”. European Asphalt Pavement Association, Bruxelas, Bélgica.
- Martinho, F. (2004). “Reciclagem de Pavimentos - Estado da Arte, Situação Portuguesa e Selecção do Processo Construtivo”. Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da F.C.T. da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Martinho, F., Picado-Santos, L. e Pais, J. (2004). “Reciclagem de Pavimentos Rodoviários - Selecção do Processo Construtivo”. Actas do III Congresso Rodoviário Português – Estrada 2004, Ed. CD, Lisboa.
- Miranda, C. (2006). “Concepção e Construção de um Leito de Pavimento em Material Fresado de Misturas Betuminosas, num Trecho da A1 - AE do Norte”. Actas do IV Congresso Rodoviário Português, Centro Rodoviário Português, Ed. CD, Lisboa.
- Moreira, J., Pereira, P. e Correia, A. (2006). “Contribuição para a Reutilização de Material Fresado em Camadas Estruturais de Pavimentos”. Actas do IV Congresso Rodoviário Português, Centro Rodoviário Português, ed. CD, Lisboa.
- NAPA@ (2006). <http://www.hotmix.org>. National Asphalt Pavement Association (página Internet oficial), EUA.
- Picado-Santos, L. e Baptista, A. M. (2003). “IP5 – Estudo da Reciclagem a Quente em Central”. *3.º Relatório de Progresso, Protocolo de Cooperação Departamento de Engenharia Civil da F.C.T. da Universidade de Coimbra /LUSOS CUT-CP*, Coimbra.
- Picado-Santos, L. e Baptista, A. M. (2002). “IP5 – Troço Angeja/A1. Estudo da Reciclagem do Pavimento”. *2.º Relatório de Progresso, Protocolo de Cooperação Departamento de Engenharia Civil da F.C.T. da Universidade de Coimbra /LUSOS CUT-CP*, Coimbra.

2 TÉCNICAS DE RECICLAGEM DE MISTURAS BETUMINOSAS

2.1 Considerações Iniciais

São vários os materiais que se podem reciclar em obras de pavimentação rodoviária. Neste capítulo descrevem-se essencialmente as técnicas de reciclagem em que estão envolvidas misturas betuminosas provenientes das camadas de pavimentos degradados. Todavia, em algumas dessas técnicas, também as camadas granulares podem intervir no processo de reciclagem.

As misturas betuminosas recicladas (MBR), independentemente da técnica de reciclagem usada, podem ser aplicadas na obra de onde provêm – em camadas de reforço ou substituindo as camadas degradadas – ou ainda aplicadas em outras obras novas ou de reabilitação de pavimentos rodoviários.

Uma descrição circunstanciada das diferentes técnicas de reciclagem de materiais usados em pavimentação rodoviária (que não só as misturas betuminosas) pode ser consultada em trabalhos de investigação realizados recentemente, como por exemplo Martinho (2004) e Batista (2004), ou ainda em artigos de divulgação como em Picado-Santos (2005), entre outras contribuições, pelo que não se justifica uma descrição muito detalhada dos diferentes processos de reciclagem. Por essa razão, irá fazer-se apenas uma breve exposição das técnicas de reciclagem de misturas betuminosas, agrupando-as em função do local de reciclagem: em central ou *in situ*.

Tendo em conta que o objectivo principal do trabalho é contribuir para o estudo e aplicação das misturas betuminosas recicladas a quente em central (MBRQ), irá dar-se particular atenção à técnica, abordando as respectivas variantes de fabrico.

Ora, um dos aspectos a considerar, no estudo das MBRQ, é a temperatura dos componentes (material fresado, agregados e betume) a usar no processo de fabrico destas misturas. Por essa razão, será ainda estudada neste capítulo a questão do equilíbrio térmico no fabrico de MBRQ.

2.2 Técnicas de Reciclagem

A reciclagem de misturas betuminosas pode ser concretizada recorrendo a diferentes técnicas: a frio ou a quente, *in situ* ou em central, e com distintos ligantes (betume asfáltico, emulsão betuminosa ou cimento). As principais técnicas de reciclagem de misturas betuminosas resumem-se no Quadro 2.1.

Quadro 2.1 – Principais técnicas de reciclagem (adaptado de Martinho e Picado-Santos, 2005)

<u>Tipo de reciclagem</u>	<u>Local de mistura</u>	
	<i>In situ</i>	Em central
- Reciclagem a frio com cimento	Sim	Não
- Reciclagem a frio com emulsão betuminosa	Sim	Sim
- Reciclagem a frio com betume-espuma	Sim	Sim
- Reciclagem semi-quente com emulsão betuminosa	Não	Sim
- Reciclagem a quente	Sim	Sim

Da análise do Quadro 2.1 resultam as oito principais técnicas de reciclagem de misturas betuminosas, quatro realizáveis *in situ* e as restantes reciclando as misturas em central. Em ambos os casos, além do ligante, pode ser adicionado agregado correctivo à mistura.

No primeiro grupo, após a fresagem dos materiais (misturas betuminosas e/ou materiais das camadas granulares) é adicionado o respectivo ligante, seguindo-se a aplicação sequencial da mistura reciclada. Nestas técnicas, regra geral, todo o material fresado é incorporado na nova mistura.

Nas técnicas de reciclagem em central, o material a reciclar, normalmente proveniente da fresagem, é transportado para central sendo depois incorporado na produção das misturas recicladas, as quais são aplicadas no local de proveniência do material fresado ou noutras obras.

Na reciclagem a frio com cimento (Figura 2.1), *in situ*, aos materiais a reciclar (misturas betuminosas e materiais das camadas granulares) é adicionada calda de cimento (cimento e água).

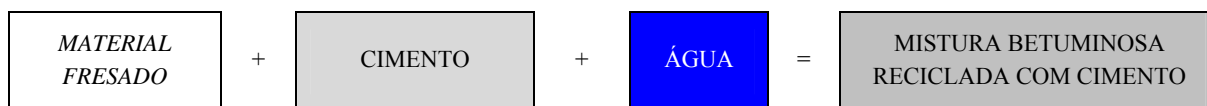


Figura 2.1 – Esquema da obtenção de mistura reciclada a frio com cimento

As misturas recicladas a frio com emulsão betuminosa, *is situ* ou em central, resultam da mistura do material a reciclar e eventuais materiais correctivos, com emulsão betuminosa e água (Figura 2.2).



Figura 2.2 – Esquema da obtenção de mistura reciclada a frio com emulsão betuminosa

A reciclagem a frio com betume-espuma, *in situ* ou em central, é idêntica à anterior, sendo o betume-espuma misturado com o material a reciclar (misturas betuminosas e/ou camadas granulares) e água (Figura 2.3).



Figura 2.3 – Esquema da obtenção de mistura reciclada a frio com betume-espuma

Nas misturas recicladas a quente, em central ou *in situ*, o ligante usado é o betume asfáltico e no caso da reciclagem semi-quente é uma emulsão betuminosa modificada. Nas secções seguintes faz-se a descrição das técnicas, agrupando-as de acordo com o local em que é feita a mistura (*in situ* ou em central).

De qualquer modo, descrições mais completas podem ser encontradas em Martinho e Picado-Santos (2005), Picado Santos (2005) e Branco *et al.* (2005), que aliás se tomaram como referência para as secções seguintes.

2.3 Breve Descrição das Técnicas de Reciclagem In Situ

2.3.1 Reciclagem a frio *in situ* com cimento

Em pavimentos degradados, com elevada espessura das camadas granulares, a reciclagem com cimento pode constituir, na maioria dos casos, uma solução económica e tecnicamente adequada. A camada reciclada acaba por constituir uma camada do tipo “agregado de granulometria extensa tratado com cimento” (AGEC) e apresenta resistência muito mais alta que a anterior, passando a estrutura final a ser idêntica a um pavimento semi-rígido (Branco *et al.*, 2005).

A sequência construtiva adoptada envolve as fases que se ilustram na Figura 2.4. A introdução do cimento na mistura pode ser feita a seco ou em calda (por via húmida), conforme ilustra a Figura 2.4.

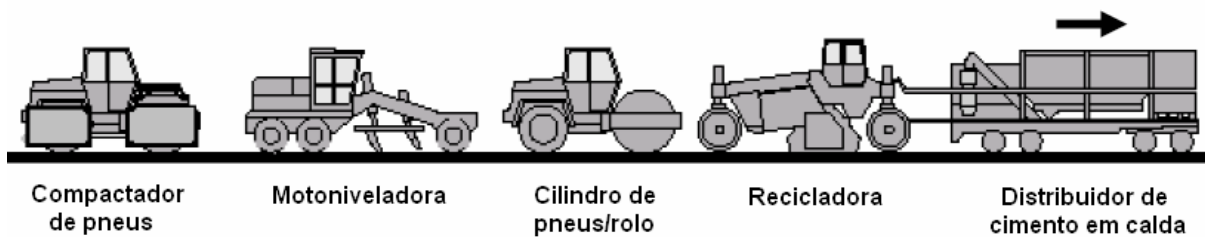


Figura 2.4 – Fases da reciclagem a frio *in situ* com cimento em calda (Martinho, 2004 - traduzido e adaptado de Wirtgen, 2004)

Esta alternativa, apesar de aumentar muito a vida residual da estrutura reabilitada, apresenta algumas limitações. Obriga sempre à consideração de camadas de reforço, capazes de contrariar o natural fendilhamento da camada reciclada, sendo alternativas as misturas fabricadas com betume modificado com borracha, BMB, e a aplicação duma “*Stress Absorbing Membrane Interlayer*”, SAMI (por exemplo, Applied Polymerics@, 2006).

2.3.2 Reciclagem a frio *in situ* com emulsão betuminosa

Esta técnica é semelhante à reciclagem com cimento, variando apenas o ligante que é uma emulsão betuminosa de cura lenta. As emulsões são sistemas coloidais, ou seja, dois líquidos imiscíveis, a água e o betume, que coabitam através da dispersão de pequenas gotículas de betume na água, o que é ajudado pela introdução dum sabão ácido ou básico que assegura aquela dispersão. Na Figura 2.5 apresenta-se um esquema de produção de mistura reciclada *in situ* com emulsão betuminosa.

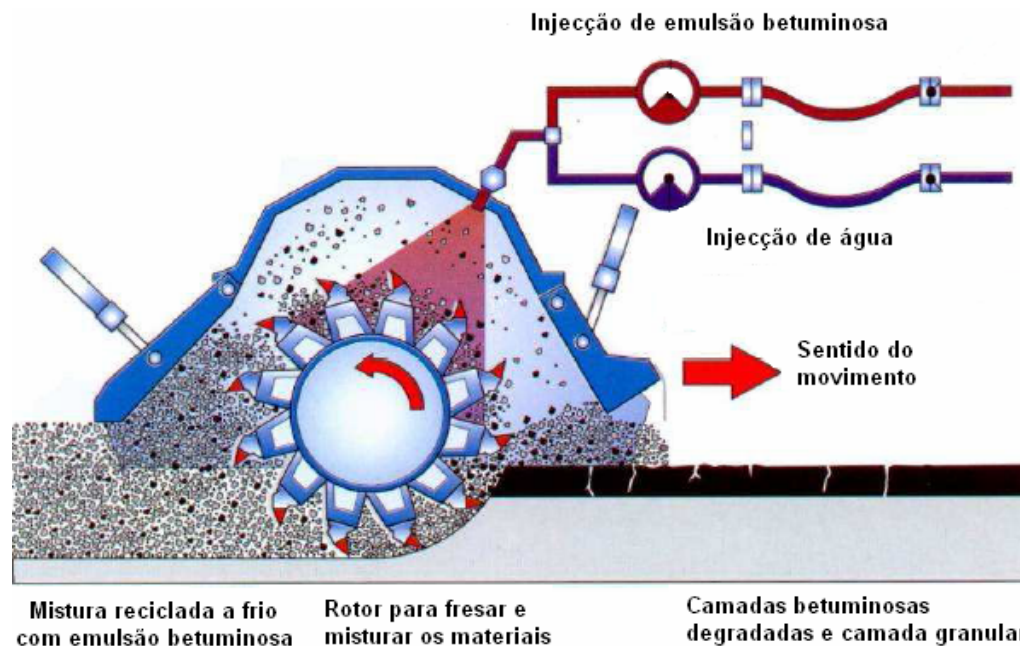


Figura 2.5 – Esquema de produção de mistura reciclada a frio *in situ* com emulsão betuminosa (adaptado de Wirtgen, 2004)

A sequência do processo de reciclagem envolve as fases que se observam na Figura 2.6. As desvantagens da técnica estão associadas a uma maior sensibilidade às condições meteorológicas. A reciclagem a frio *in situ* com emulsão exige um tempo de cura de duas a três semanas, não devendo nesse período ser aplicada nova camada. Por essa razão, é extremamente importante que os trabalhos se realizem em tempo seco, sendo a técnica não recomendada em zonas húmidas.

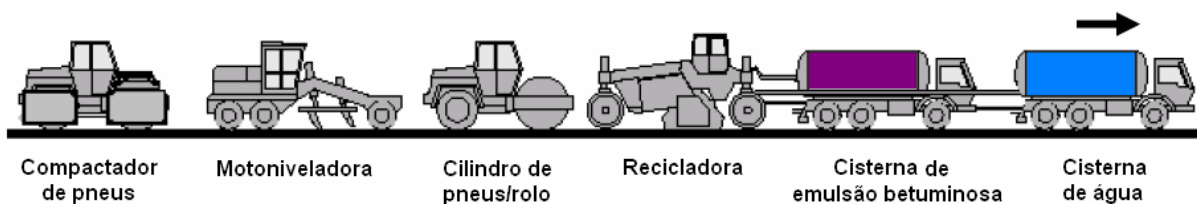


Figura 2.6 – Fases da reciclagem a frio *in situ* com emulsão betuminosa (Martinho, 2004 - traduzido e adaptado de Wirtgen, 2004)

2.3.3 Reciclagem a frio *in situ* com betume-espuma

Nesta técnica usa-se o betume-espuma que se produz conforme esquematizado na Figura 2.7. O betume-espuma, tal como a emulsão betuminosa, é também um sistema coloidal mas em que a fase dispersa é um gás (o vapor de água) num líquido (o betume) inicialmente aquecido (Ribeiro, 2003). Trata-se de uma técnica bastante recente, que pode ser utilizada não só com materiais betuminosos e que melhora a resistência ao corte e a susceptibilidade à água dos materiais granulares reciclados. Apresenta ainda a vantagem, comparativamente às misturas recicladas com emulsão, de a circulação poder ser reposta logo após a compactação não estando, portanto, sujeita a um processo de cura (Picado-Santos, 2005).

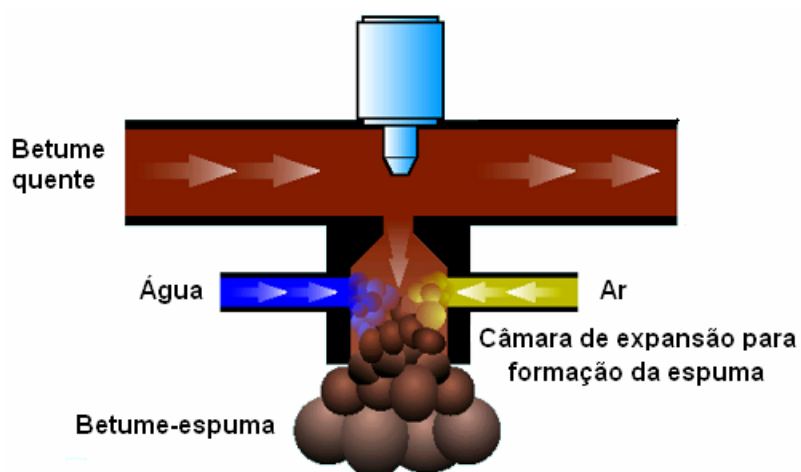


Figura 2.7 – Esquema da obtenção do betume-espuma (adaptado de Wirtgen, 2004)

Na Figura 2.8 apresenta-se um esquema de produção de mistura reciclada *in situ* com recurso a betume-espuma. A sequência do processo de reciclagem envolve as fases que se observam na Figura 2.9.

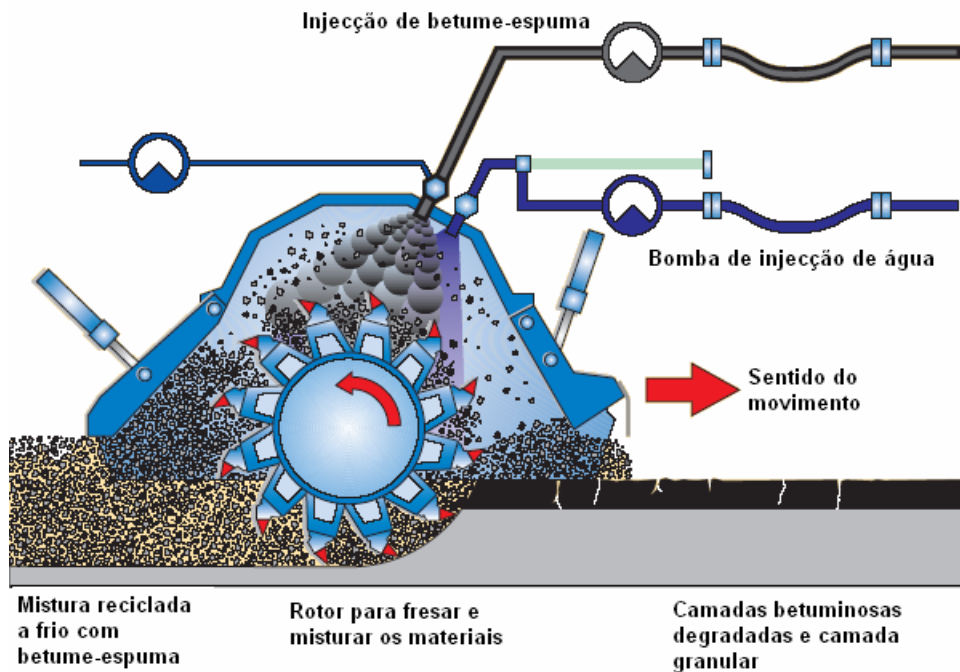


Figura 2.8 – Esquema da produção de mistura reciclada a frio *in situ* com betume-espuma (adaptado de Wirtgen, 2004)

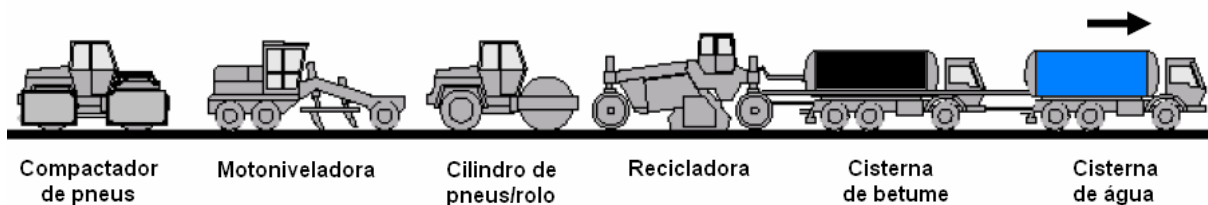


Figura 2.9 – Fases da reciclagem a frio *in situ* com betume-espuma (Martinho, 2004 - traduzido e adaptado de Wirtgen, 2004)

2.3.4 Reciclagem a quente *in situ*

Esta técnica difere dos processos a frio na medida em que o ligante é aquecido. Existem duas variantes: a termo-reperfilagem e a termo-regeneração. A primeira consiste no aquecimento do pavimento seguido da sua compactação, tendo por objectivo selar as fendas existentes e repor a regularidade longitudinal do pavimento. A termo-regeneração (Figura 2.10) compreende o aquecimento das camadas betuminosas, a sua escarificação, recomposição, nivelamento e compactação em nova camada. Após a reciclagem da camada existente é aplicada uma mistura nova com características de camada de desgaste. Esta técnica é especialmente adequada para obras de reabilitação funcional do pavimento.



Figura 2.10 – Fases da reciclagem a quente *in situ* (Martinho e Picado-Santos, 2006)

2.4 Breve Descrição das Técnicas de Reciclagem em Central

São quatro as principais técnicas de reciclagem em central: a reciclagem a frio com emulsão betuminosa, a reciclagem a frio com betume-espuma, a reciclagem semi-quente com emulsão betuminosa modificada e a reciclagem a quente com betume.

2.4.1 Reciclagem a frio em central com emulsão betuminosa

Após a fresagem das camadas do pavimento existente, o material é transportado para central onde é misturado com a emulsão betuminosa à temperatura ambiente, seguindo-se o transporte e aplicação na obra de proveniência ou noutra obra (Figura 2.11). Tal como se referiu para a reciclagem *in situ*, existem limitações de ordem meteorológica, que devem ser levadas em conta durante o período de cura.



Figura 2.11 – Esquema do processo de reciclagem em central com emulsão betuminosa (adaptado de Wirtgen, 2003)

2.4.2 Reciclagem a frio em central com betume-espuma

A técnica é idêntica à anterior diferindo apenas no ligante, sendo o processo de obtenção do betume-espuma igual ao descrito para a reciclagem *in situ* com betume-espuma. Na Figura 2.12 mostra-se um esquema resumido das fases que compreende esta técnica.

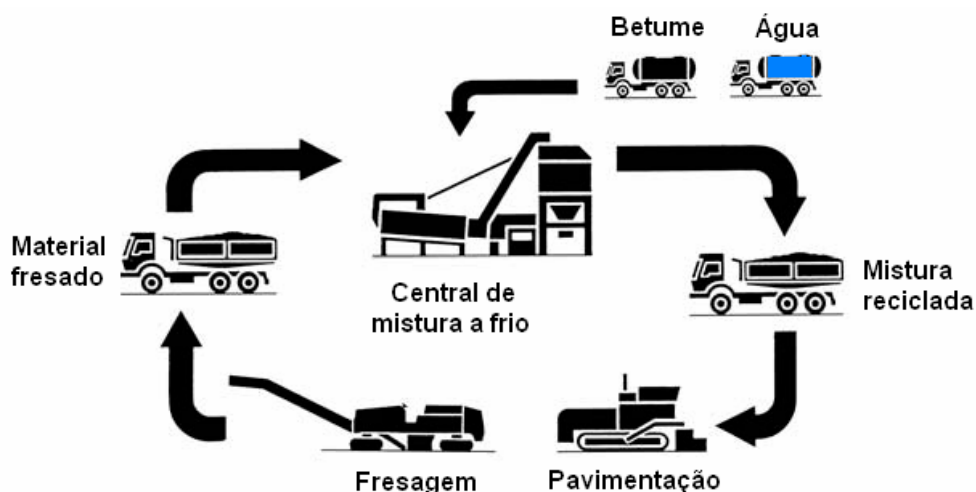


Figura 2.12 – Esquema da reciclagem a frio em central com betume-espuma (adaptado de Wirtgen, 2003)

2.4.3 Reciclagem semi-quente em central

Na reciclagem semi-quente em central o ligante é uma emulsão betuminosa (Figura 2.13) e é possível reciclar a totalidade do material fresado.

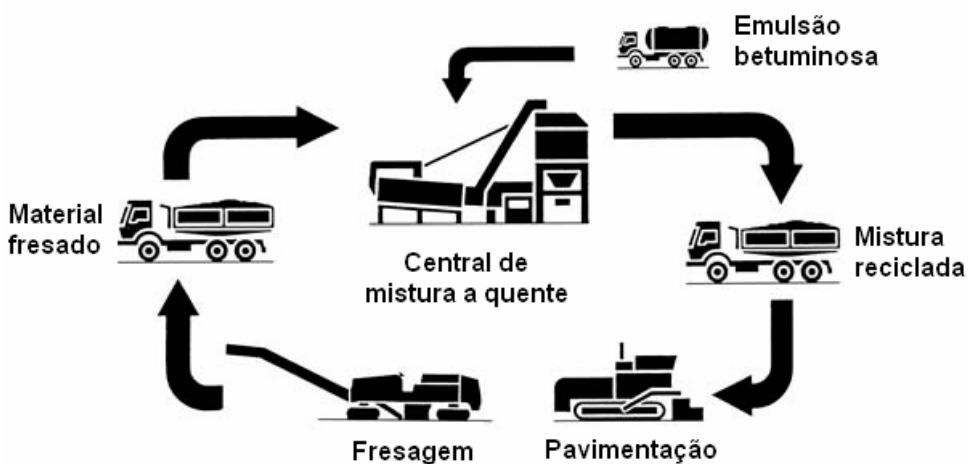


Figura 2.13 – Esquema do processo de reciclagem semi-quente em central (adaptado de Wirtgen, 2003)

Nesta técnica o material fresado é aquecido a cerca de 90°C no tambor secador de uma central a quente, contínua ou descontínua, para o misturar posteriormente no misturador da central, no caso das descontínuas, ou no tambor no caso de tambor-secador-misturador (TSM), com uma emulsão betuminosa adequada (Tavares e Vieira, 2006). A mistura pode ser armazenada durante 24 h sempre que o “espalhamento e compactação” sejam efectuados a temperatura superior ou igual a 60°C. O aquecimento a que é submetido o material fresado permite que a abertura ao tráfego seja imediata, eliminando-se assim o período de cura necessário no caso da reciclagem a frio com emulsão.

2.4.4 Reciclagem a quente em central

A técnica de reciclagem a quente em central (Figura 2.14) consiste em fabricar uma mistura betuminosa a quente, utilizando materiais fresados de pavimentos antigos de modo a conseguir bons resultados técnico-económicos e ambientais (Picado-Santos, 2005; Branco *et al.*, 2005). Para isso, são adicionados novos materiais correctivos, agregados e betume, de modo a conseguir misturas com desempenho idêntico ao das misturas fabricadas a quente sem incorporação de material fresado.



Figura 2.14 – Esquema do processo de reciclagem a quente em central (adaptado de Wirtgen, 2003)

A reciclagem a quente apresenta claras vantagens de ordem económica e ambiental. Desde logo pela economia ao nível dos agregados e do betume, esta última mais acentuada com o aumento que se tem observado nos últimos anos no preço do petróleo bruto. Ao nível ambiental podem indicar-se o menor consumo de recursos naturais (betume e agregados) e uma melhor aplicação dos materiais provenientes da fresagem. Comparativamente às restantes técnicas identifica-se a vantagem da mistura reciclada apresentar características mecânicas idênticas às das misturas tradicionais, não baixando assim a sua contribuição em termos de resistência (Branco *et al.*, 2005).

As desvantagens, normalmente associadas à produção, estão relacionadas com a quebra na capacidade de produção das centrais e com o maior aquecimento dos agregados e, portanto, maiores custos energéticos. No entanto, deve dizer-se que, embora a temperatura de aquecimento seja mais alta que o normal, a quantidade de agregados novos também é menor, pelo que em termos de gastos energéticos, se a temperatura final da mistura for igual à das misturas betuminosas a quente, o consumo é idêntico (Picado-Santos, 2005).

2.5 A Técnica de Reciclagem a Quente em Central

2.5.1 Nota introdutória

Uma das fases do processo geral de reciclagem a quente em central, antes descrito, envolve a produção das MBRQ na central de produção adaptada. Nesta fase da técnica, a mais delicada, existem muitas variantes de fabrico que se irão tratar com mais pormenor nesta secção. Todavia, antes, clarificam-se alguns conceitos relativos às MBRQ e apresenta-se um breve historial das obras realizadas em Portugal e do posicionamento do país no contexto europeu.

2.5.2 Conceitos de base

No âmbito dos estudos da reciclagem de misturas betuminosas a quente, tal como noutras áreas de investigação de novos materiais de pavimentação rodoviária, existem designações diferentes para o mesmo material ou propriedade e que acabam por gerar dificuldades de interpretação. Convinha, por isso, pelo menos atenuar tais dissonâncias, através da definição de um vocabulário específico para aquelas misturas e que seja consensual no meio técnico rodoviário.

Assim, com o intuito de uniformizar e justificar as opções tomadas nesta matéria, faz-se a seguir uma síntese dos principais conceitos relativos às misturas betuminosas recicladas a quente e aos seus materiais constituintes.

- Materiais constituintes

Como se viu, uma MBRQ resulta da combinação de misturas betuminosas envelhecidas desagregadas, normalmente resultantes da fresagem das camadas superiores de pavimentos rodoviários flexíveis, e de materiais novos, agregados e betume (Figura 2.15). Em certos casos é usado um rejuvenescedor do betume existente nas misturas envelhecidas.



Figura 2.15 – Esquema dos materiais constituintes de uma mistura betuminosa reciclada a quente com betume

Constata-se que o material a reciclar é designado de forma diferente, de país para país, e até dentro do mesmo país, como é o caso de Portugal. Nos Estados Unidos da América (EUA) usa-se correntemente a designação *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP), em Espanha *Mezcla Betuminosa a Reciclar* ou *Material Betuminoso a Reciclar*, e em Portugal, além daquelas, usa-se também a designação de *Mistura Betuminosa Fresada* e, recentemente, *Resíduos de Misturas Betuminosas* considerada na especificação E 472 editada pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC, 2006).

No contexto nacional é comum designar a mistura final de *Mistura Betuminosa Reciclada*, o que inviabiliza, de certa forma, a escolha de *Mistura Betuminosa a Reciclar* para as misturas envelhecidas incorporadas na mistura reciclada, pelo facto de a abreviatura a adoptar acabar por vir a ser igual à das primeiras. A designação de RAP, embora muito conhecida, não colhe no meio técnico rodoviário nacional grande aceitação, sendo mais correntes designações em língua portuguesa (misturas fresadas, fresado, fresados, material fresado ou material fresado de misturas betuminosas).

Para contornar tal situação, não tanto a linguística mas antes a da eventual coincidência de abreviaturas, e tendo em consideração que as misturas a reciclar são na sua grande maioria procedentes da fresagem e que mesmo as provenientes de placas retiradas de pavimentos após desagregação e/ou britagem, quando em depósito, tem o mesmo aspecto do material fresado, adoptou-se esta última designação (*material fresado*) para as misturas betuminosas envelhecidas, fresadas, desagregadas e incorporadas na *mistura betuminosa reciclada a quente* (MBRQ).

Ao longo deste trabalho irá usar-se o índice "F" de "Fresado", sempre que se trate de propriedades ou abreviaturas associadas ao material fresado, o índice "R", de "Reciclada" ou "Reciclado", no que respeita às MBR ou MBRQ, e o índice "N", de "Novo", no caso dos materiais novos a adicionar (betume ou material agregado).

Para as misturas betuminosas fabricadas a quente usadas em Portugal, adoptou-se a abreviatura habitual (JAE, 1995): MB, para macadame betuminoso; MBD, para mistura betuminosa densa; e BD, para betão betuminoso em camada de desgaste. Por consequência, aquelas misturas, quando recicladas, designar-se-ão macadame betuminoso reciclado (MB_R), mistura betuminosa densa reciclada (MBD_R) e betão betuminoso reciclado (BD_R). Nos trabalhos experimentais foram estudadas misturas recicladas do tipo MB_R e BD_R.

- Taxas de reciclagem

Em termos globais e pensando em termos de determinada obra, se a quantidade de material fresado for baixa, poderá observar-se uma reutilização de 100%, mesmo recorrendo a uma taxa de reciclagem (TR) baixa (15% a 20%). Por outro lado, se a quantidade de material fresado for elevada, mesmo que em determinadas técnicas se possa ter uma incorporação de 100%, poderá não ser possível reciclar todo o material fresado. Concluindo, para uma mesma obra, pode reutilizar-se todo o material fresado com TR reduzidas e pode não ser possível reciclar todo o material fresado mesmo com incorporações elevadas.

Assim, o conceito de taxa de reciclagem (TR) pode eventualmente ser usado em dois sentidos: pode estar a falar-se da proporção de material fresado usado no fabrico numa MBRQ, este o mais habitual, ou referir-se à percentagem de material fresado disponível e que na realidade

foi reutilizado. Neste trabalho será sempre no primeiro sentido que se utiliza o conceito de taxa de reciclagem.

A taxa de reciclagem (TR), por vezes designada de taxa de incorporação ou percentagem de reciclagem, representa então a proporção de material que se recicla ou, o que é o mesmo, a percentagem de material fresado na mistura betuminosa reciclada. A TR, expressa em percentagem, corresponde à relação entre a massa total do material fresado, mt_F , e a massa total da mistura reciclada, mt_R .

$$TR = \frac{mt_F}{mt_R} \quad (2.1)$$

Define-se também a taxa de reciclagem de agregado, TRa, que relaciona a massa de agregado do material fresado, ma_F , e a massa de agregado da mistura reciclada, ma_R .

$$TRa = \frac{ma_F}{ma_R} \quad (2.2)$$

Por fim, define-se a taxa de reciclagem de betume, TRb, a qual representa a proporção entre a massa de betume envelhecido, mb_F , e a massa de ligante total da mistura reciclada, mb_R .

$$TRb = \frac{mb_F}{mb_R} \quad (2.3)$$

2.5.3 Dados sobre reciclagem a quente em central

A realidade europeia sobre a implementação da reciclagem a quente é bem diferente da nacional. Em alguns países europeus a técnica de reciclagem a quente representa actualmente mais de 75% das misturas recicladas, casos da Alemanha, Dinamarca e Holanda, e noutros os indicadores relativos à reciclagem também são ambientalmente muito animadores (Quadro 2.2).

Apesar de Portugal não constar da lista, identificam-se alguns sucessos de aplicação da técnica em obras nacionais (Quadro 2.3), sendo a mais recente a intervenção no troço Pombal-Condeixa da auto-estrada A1 (Bragança e Pires, 2006).

2.5.4 Processos de fabrico das misturas recicladas a quente

As misturas recicladas a quente em central podem ser produzidas em centrais descontínuas ou contínuas, desde que sejam preparadas para a introdução do material fresado, a frio ou aquecido, ou adaptadas para o efeito. O que se irá descrever a seguir segue de perto o conteúdo do documento “Directivas ambientais sobre as melhores técnicas disponíveis (BAT) para a produção de misturas betuminosas” (EAPA, 1998).

Quadro 2.2 – Dados sobre a reciclagem a quente em alguns países da Europa (Fonte: EAPA, 2003, 2004, 2005, 2006)

PAÍS	Quantidade de material fresado disponível (10 ³ toneladas)				Percentagem de material reciclado a quente (%)				Misturas recicladas em relação ao total fabricado (%)			
	2002	2003	2004	2005	2002	2003	2004	2005	2002	2003	2004	2005
Alemanha	15000	14000	14000	14000	80	82	82	82	20	21	60	60
Áustria	500	450	450	550	-	5	5	10	5	5	5	-
Bélgica	1500	1500	1500	1500	29	35	38	40	31	30	32	36
Dinamarca	237	293	271	218	54	65	77	83	36	47	46	48
Espanha	-	-	1638	2250	-	-	11	8	-	-	4,5	3,5
França	5000	5100	6500	6500	10-45	10-45	13	13	>15	<10	<10	<10
Holanda	3500	4000	3800	3000	60-70	60	60	75	60-65	58	65	63
Irlanda	10	20	25	36	-	30	30	35	-	<1	<1	1,5
Itália	13000	14000	14000	14000	15	18	18	18	5	5,9	6,5	7
Noruega	471	260	288	409	19	17	18	23	7	10	10	10
Polónia	750	900	900	1080	15-30	15-30	15-30	4	0,5	0,5	0,3	0,1
Reino Unido	0	5000	5000	4500	-	-	-	-	-	-	<10	-
Rep. Checa	354	550	554	425	10-40	10-40	0	-	18	10-15	15	-
Suécia	900	750	800	750	15	15	15	40	20	20	25	25
Suiça	1900	2100	2300	900	17	19	20	50	-	-	-	-

Quadro 2.3 – Principais obras com reciclagem a quente em central, realizadas em Portugal e estudos em curso (Rodrigues, 2006)

Designação da obra	ANO	ÁREA (m ²)
EN 108 – Pavimentação entre Porto e Entre-os Rios	1998	480000
EN 105 – Reabilitação pavimentos Travagem (km 5+718) e S.Tirso (km 22+500)	1998	
SCUT da Costa da Prata (com material fresado na A1)	2004	-
A1 – Pombal Condeixa – Beneficiação e Reforço do Pavimento	2004	600000
EN 1 – Pavimentação entre Landiosa e Picoto (Aveiro)	2007	193000
IC 2 – Beneficiação entre LD Leiria/Coimbra e Condeixa	A adjudicar	168000
Beneficiação entre Viana do Castelo (km 70+475) e Caminha (km 91+400) (inclui também reciclagem “ <i>in situ</i> ” com cimento e emulsão)	Em Estudo	-
IP8 – Troço entre Sines e Santiago do Cacém (inclui também reciclagem “ <i>in situ</i> ” com cimento)	Em Estudo	-

- Fabrico em centrais descontínuas

Nas centrais descontínuas são quatro as variantes de reciclagem. O material fresado pode ser introduzido a frio junto com os agregados ou directamente na unidade de mistura (método a frio). Para alcançar taxas de reciclagem mais elevadas o material fresado pode ser aquecido e introduzido na unidade de mistura (método a quente) ou aquecido junto com os agregados (método *recyclean*) antes de ser elevado para a unidade de mistura.

Quando o material fresado não é aquecido, os agregados são mais sobreaquecidos de modo a que a mistura reciclada apresente uma temperatura final adequada. Por isso, nestes métodos, só em condições especiais se consegue ir além de incorporações de 30%. Por outro lado, sendo o material fresado aquecido em separado ou em conjunto com os agregados novos (método *recyclean*) conseguem-se taxas de reciclagem que podem atingir, no primeiro caso 70% e no segundo pelo menos 35% (EAPA, 1998).

Na Figura 2.16 apresenta-se um esquema de funcionamento de central betuminosa descontínua seguindo o método a frio.

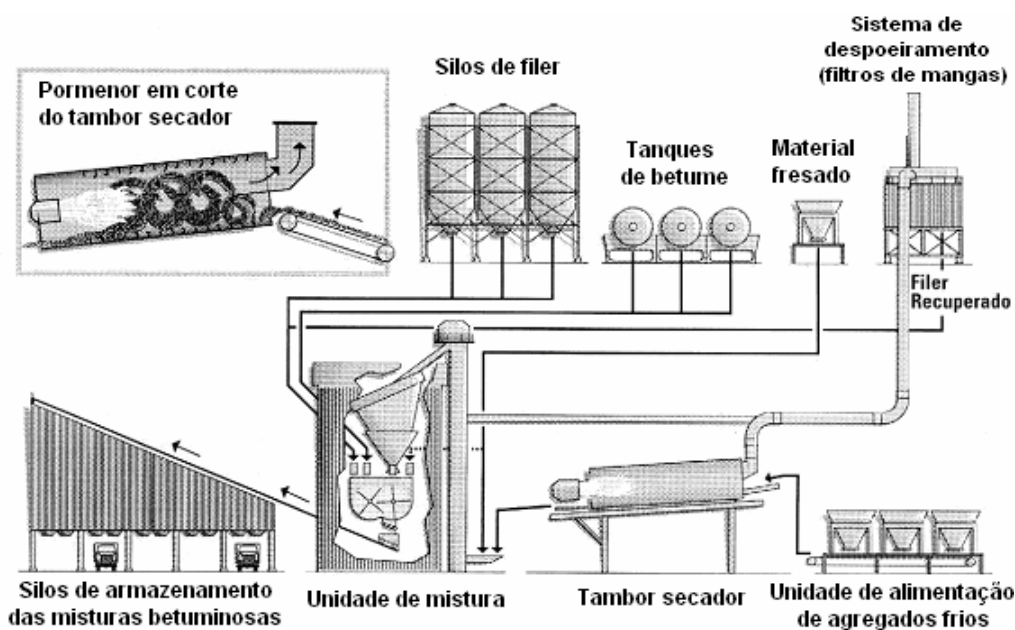


Figura 2.16 – Esquema de funcionamento de central betuminosa descontínua com incorporação de material fresado a frio (adaptado de EAPA, 1998)

No método a quente (Figura 2.17), onde se conseguem taxas de reciclagem mais elevadas e que podem atingir os 70%, o material fresado é aquecido num tambor secador paralelo antes de ser introduzido na unidade de mistura.

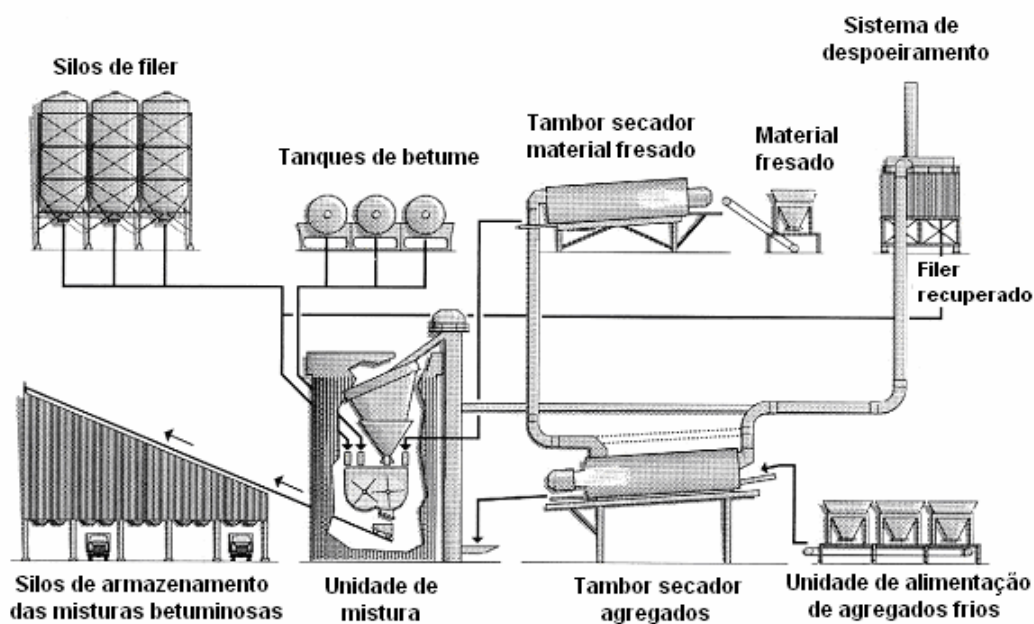


Figura 2.17 – Esquema de funcionamento de central betuminosa descontínua com incorporação de material fresado a quente (adaptado de EAPA, 1998)

Outra variante, o método *recyclean*, consiste em introduzir o material no tambor secador de aquecimento dos agregados através dum anel localizado na zona indicada na Figura 2.18.

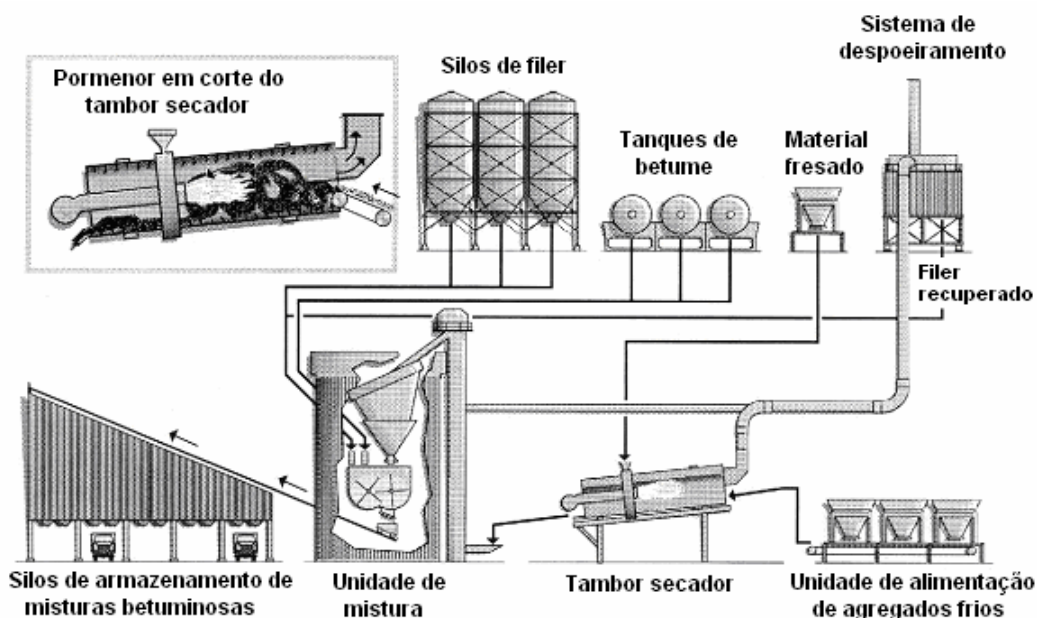


Figura 2.18 – Esquema de funcionamento de central betuminosa descontínua com incorporação de material fresado pelo método *Recyclean* (adaptado de EAPA, 1998)

No método a frio, existe ainda a chamada central de torre (Figura 2.19) em que o material fresado é introduzido a frio directamente na unidade de mistura. Neste tipo de central existe um armazenamento intermédio dos agregados aquecidos, assegurado através de silos localizados por cima da unidade de mistura, correspondendo a cada silo uma determinada fracção granulométrica. A central apresenta um funcionamento muito flexível, permitindo, com facilidade, variar o tipo de mistura ou a fórmula de trabalho.

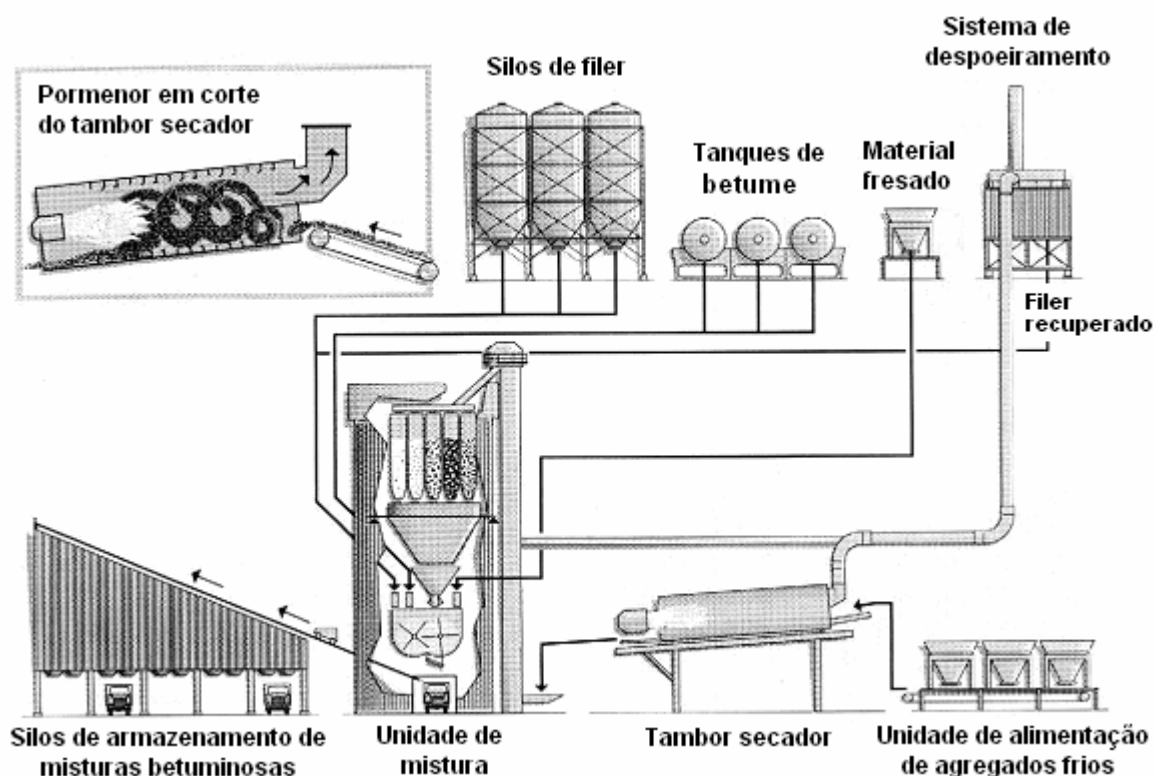


Figura 2.19 – Esquema de funcionamento de central de torre com incorporação de material fresado a frio (adaptado de EAPA, 1998)

- Fabrico em centrais contínuas

Nas centrais contínuas, antes de adicionar o betume, o material fresado pode ser aquecido, no tambor-secador-misturador (TSM), directamente pelos gases de combustão quentes ou por contacto com os agregados sobreaquecidos. Na Figura 2.20 mostra-se a configuração genérica duma central contínua adaptada ao fabrico de misturas recicladas a quente.

Para a produção de MBRQ em central contínua, existem diversas variantes de fabrico, sendo as principais: central com TSM de fluxos paralelos, central com TSM com fluxos contracorrente e a central contínua de tambor duplo.

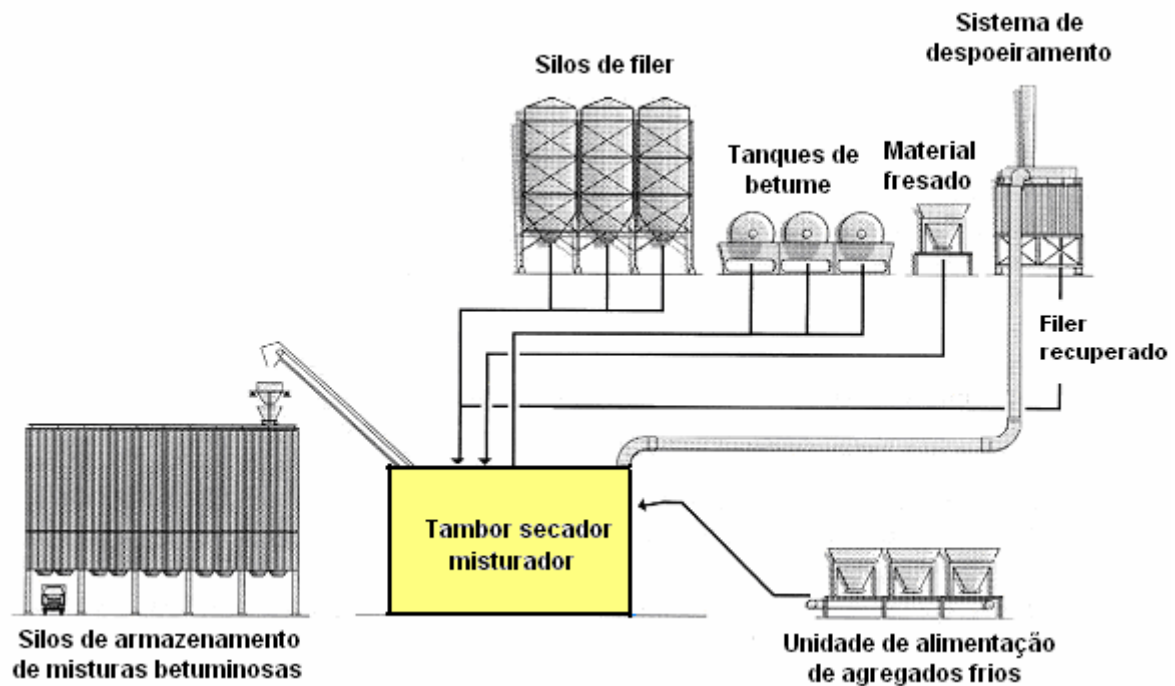


Figura 2.20 – Esquema de central betuminosa contínua adaptada ao fabrico de MBRQ (adaptado de EAPA, 1998)

Na central contínua com TSM de fluxos paralelos (Figura 2.21), assim designada porque o fluxo dos gases de combustão quentes e dos agregados é o mesmo, existe uma alimentação separada do material fresado que, após processamento, é introduzido num anel localizado na parte central do tambor. Nesta zona, a temperatura dos gases é mais baixa e permite a introdução do material fresado que depois é aquecido por contacto com os agregados sobreaquecidos e pelos gases de combustão quentes.

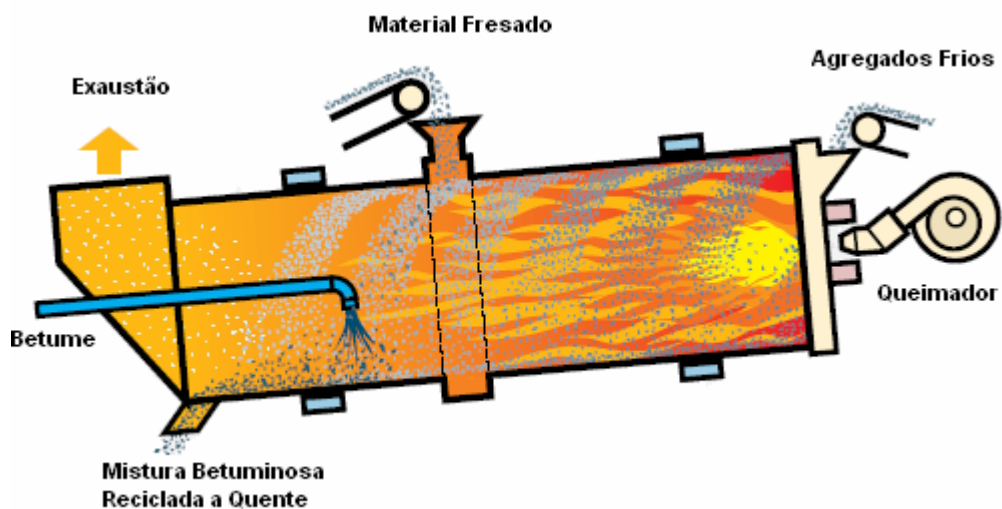


Figura 2.21 – Esquema do TSM de central contínua de fluxos paralelos (adaptado de Brock, 2003)

Na solução de TSM de fluxos contracorrente (Figura 2.22) o fluxo dos gases de combustão é oposto ao sentido de deslocação dos agregados e o queimador localiza-se a montante da zona de introdução do material fresado, ficando assim garantido que o material fresado não contacta directamente com a chama ou com os gases quentes. Assim, o material fresado é aquecido apenas devido ao contacto com os agregados quentes.

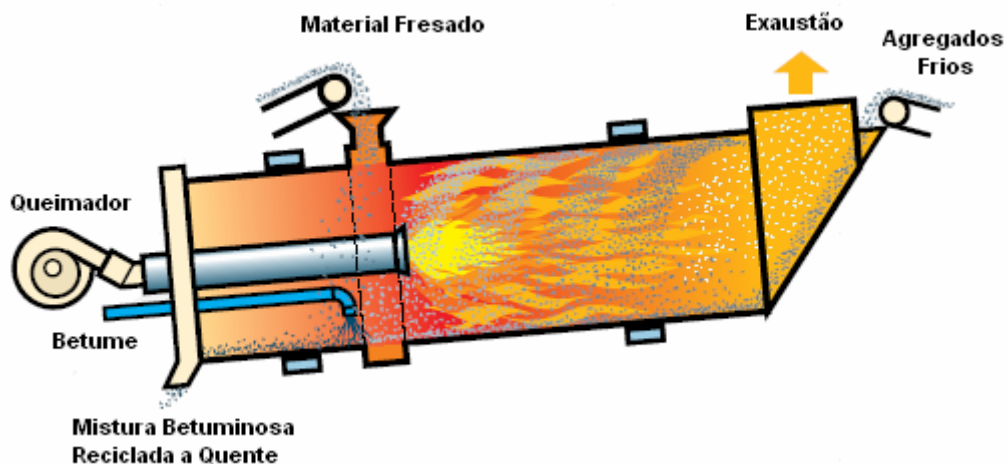


Figura 2.22 – Esquema de TSM de central contínua de fluxos contracorrente (adaptado de Brock, 2003)

Numa central contínua com tambor duplo (Figura 2.23), existe um tambor rotativo de fluxos contracorrente que é envolvido por um tambor exterior fixo. O material fresado é introduzido no tambor exterior onde é misturado com os agregados que, depois de sobreaquecidos no tambor interior, passam para o tambor exterior. Desta forma, o material fresado não entra em contacto com os gases de combustão.

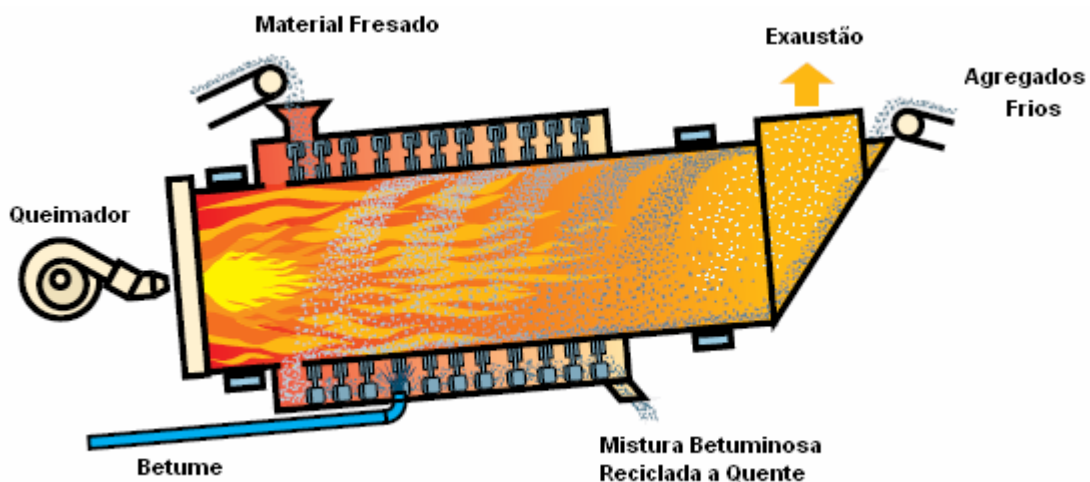


Figura 2.23 – Esquema de central contínua de tambor duplo (adaptado de Brock, 2003)

Comparativamente à solução de fluxos contracorrente, esta técnica é energeticamente mais eficiente, na medida em que a temperatura de aquecimento dos agregados é mais baixa, podendo essa diferença ser da ordem dos 100°F (40°C) para 5% de humidade do material fresado (Figura 2.24).

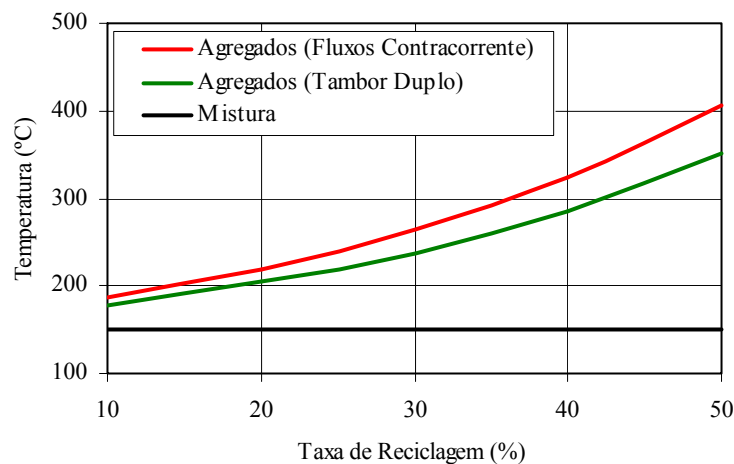


Figura 2.24 – Temperaturas observadas em centrais contínuas de fluxos contracorrente e de tambor duplo, para 5% de humidade do material fresado (Brock e Richmond, 2006)

2.5.5 Equilíbrio térmico no fabrico das misturas

O fabrico duma mistura betuminosa reciclada a quente em central resume-se à mistura de vários materiais a diferentes temperaturas. Qualquer que seja a central existe sempre perda de calor durante a mistura. Em termos de balanço térmico, para cada tipo de central, a temperatura final duma mistura betuminosa reciclada, T_m , depende da temperatura inicial dos diferentes materiais, das características térmicas dos constituintes, da composição da mistura e da humidade do material fresado.

O problema essencial será então o de saber a que temperatura se devem aquecer os agregados novos de modo a produzir misturas com uma determinada temperatura. Nas centrais em que o material fresado é aquecido por contacto directo com os agregados sobreaquecidos, a temperatura dos agregados não deve ultrapassar os 275°C (Rubio, 2003). Embora se possa admitir que um betume envelhecido perdeu muitos dos seus componentes mais combustíveis ainda lhe restam alguns. Assim, mesmo no caso de material fresado com muitos anos de serviço, o limite de 275°C deverá ser usado com algum cuidado visto que se trata de um valor muito acima da temperatura de inflamação dum betume virgem.

- Noções relativas a equilíbrio térmico

Se tivermos dois corpos a temperaturas diferentes e os colocarmos em presença um do outro, verifica-se que há uma transferência de energia térmica entre os corpos. A esta energia térmica em trânsito dá-se o nome de calor. A transferência de calor termina quando se atinge

o equilíbrio térmico, ou seja, quando os corpos se encontram à mesma temperatura. Suponha-se que uma pequena quantidade de calor, dQ , é transferida entre um sistema e a sua vizinhança. Se o sistema sofre uma mudança de temperatura dT , a capacidade calorífica específica, ou calor específico, c , do sistema, é definido por:

$$c = \frac{1}{m} \times \frac{dQ}{dT} \quad (2.4)$$

Ou seja, o calor (Q) necessário para aumentar de ΔT a temperatura da massa (m) dum corpo é:

$$Q = m \times c \times \Delta T \quad (2.5)$$

Num sistema isolado é válido o «princípio da igualdade das trocas de calor», que estabelece que quando há trocas de calor entre vários corpos isolados termicamente do meio exterior, a quantidade de calor cedida pelos corpos que arrefecem é igual à quantidade de calor recebida pelos corpos que aquecem.

Admita-se que se aquece a uma temperatura T_1 um corpo de massa m_1 e de calor específico c_1 , o qual, depois de aquecido, entra em contacto com outro corpo de massa m_2 , de calor específico c_2 e que se encontra à temperatura T_2 , com T_2 inferior a T_1 . Não havendo perdas de calor e estabelecido o equilíbrio térmico, o sistema apresenta uma temperatura final T' superior a T_2 e inferior a T_1 . A quantidade de calor cedida pelo corpo que arrefece, Q_1 , é dada por:

$$Q_1 = m_1 \times c_1 \times (T_1 - T') \quad (2.6)$$

A quantidade de calor recebida pelo outro corpo, Q_2 , é de:

$$Q_2 = m_2 \times c_2 \times (T' - T_2) \quad (2.7)$$

Existindo o equilíbrio térmico, tem-se:

$$Q_1 = Q_2 \Leftrightarrow m_1 \times c_1 \times (T_1 - T') = m_2 \times c_2 \times (T' - T_2) \quad (2.8)$$

que resolvendo em ordem a T' , conduz a:

$$T' = \frac{m_1 \times c_1 \times T_1 + m_2 \times c_2 \times T_2}{m_1 \times c_1 + m_2 \times c_2} \quad (2.9)$$

Generalizando (2.9) a n corpos, ou materiais homogéneos, se o sistema for isolado, obtém-se para temperatura final:

$$T' = \frac{\sum_{i=1}^n m_i \times c_i \times T_i}{\sum_{i=1}^n m_i \times c_i} \quad (2.10)$$

Não sendo o sistema isolado, existirá uma perda de calor, ΔQ , e a temperatura final, T , será inferior a T' . No caso simples de dois corpos, tem-se:

$$Q_1 = Q_2 + \Delta Q \Leftrightarrow m_1 \times c_1 \times (T_1 - T) = m_2 \times c_2 \times (T - T_2) + \Delta Q \quad (2.11)$$

que resolvida em ordem a T e generalizando a n corpos, conduz à expressão (2.12) onde ΔT representa a variação de temperatura devido às perdas de calor para o exterior.

$$T = \frac{\sum_{i=1}^n m_i \times c_i \times T_i}{\sum_{i=1}^n m_i \times c_i} - \frac{\Delta Q}{\sum_{i=1}^n m_i \times c_i} = T' - \Delta T \quad (2.12)$$

Porém, um dos corpos que recebe calor poderá apresentar alguma humidade. Neste caso, como a água evapora a 100°C , o calor recebido pela água é dado pela equação:

$$Q_h = m_h \times c_h \times (100 - T_h) + m_h \times l_v \quad (2.13)$$

em que,

m_h - massa de água;

c_h - calor específico da água ($4186 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$);

T_h - temperatura inicial da água ($^\circ\text{C}$);

l_v - calor de vaporização da água ($2,25 \times 10^6 \text{ J/kg}$).

Acrescentando o calor recebido pela água na equação (2.11), obtém-se:

$$m_1 \times c_1 \times (T_1 - T) = m_2 \times c_2 \times (T - T_2) + Q_h + \Delta Q \quad (2.14)$$

que resolvida em ordem a T e generalizando a n corpos, ou materiais homogêneos, conduz à expressão (2.15).

$$T = \frac{\sum_{i=1}^n m_i \times c_i \times T_i}{\sum_{i=1}^n m_i \times c_i} - \frac{Q_h}{\sum_{i=1}^n m_i \times c_i} - \frac{\Delta Q}{\sum_{i=1}^n m_i \times c_i} = T' - \frac{Q_h}{\sum_{i=1}^n m_i \times c_i} - \Delta T \quad (2.15)$$

- Aplicação às misturas betuminosas recicladas a quente

No fabrico das MBRQ, são misturados os agregados e o material fresado, sendo depois introduzidos o filer e o betume. Acresce ainda que o material fresado, quer seja introduzido a frio ou aquecido a uma temperatura inferior a 100°C, apresenta alguma humidade quando entra na unidade de mistura ou no TSM. Surge assim outro “componente”, a água, que evapora durante a mistura e que deve ser considerada no estabelecimento do equilíbrio térmico (Figura 2.25).

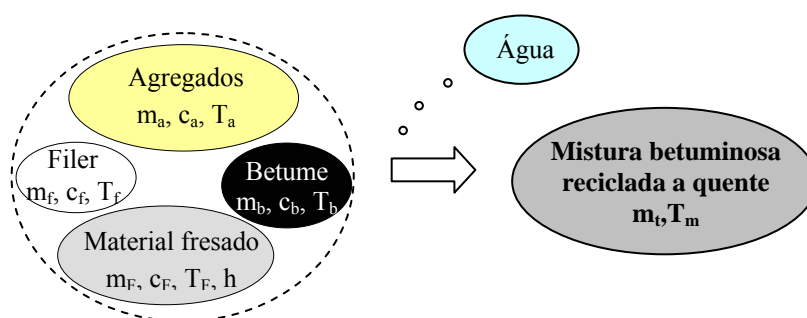


Figura 2.25 – Esquema do equilíbrio térmico no fabrico de mistura reciclada a quente

Entende-se aqui por temperatura de aquecimento dos agregados, a temperatura que os mesmos atingem quando entram em contacto com o material fresado. No caso duma central descontínua com silos de armazenamento intermédio, corresponde à temperatura a que se encontram os agregados quando entram na unidade de mistura. Numa central contínua, corresponde à temperatura mais alta atingida pelos agregados no TSM.

Note-se ainda que se separou o filer dos agregados pelo facto deste componente ser normalmente introduzido em separado e a temperatura inferior. Nas centrais descontínuas pode ser introduzido directamente na unidade de mistura ou no elevador dos agregados quentes, e nas centrais contínuas na parte final do tambor-secador-misturador (TSM).

Como a percentagem do filer na mistura é baixa, poderá eventualmente não entrar no equilíbrio térmico e ser considerado o seu efeito nas perdas de calor. O mesmo no que respeita ao betume. Como se trata dum componente que também entra numa percentagem baixa e, principalmente, porque é introduzido a uma temperatura da mesma ordem de grandeza da que se pretende para a mistura final, terá uma influência pouco significativa no balanço térmico.

Assim, estabeleceram-se leis que relacionam as temperaturas, admitindo duas metodologias: o método geral e o método simplificado. Este último incorpora a influência do filer e do betume nas perdas de calor. Para o efeito, considerou-se a simbologia da Figura 2.25 e os valores específicos indicados no Quadro 2.4.

Quadro 2.4 – Calor específico dos materiais base (Picado-Santos, 1995)

Material	Calor específico (J/kg.°C)
Agregados e filer	760
Betume	1750
Água	4186

No caso das misturas betuminosas e, também, do material fresado o calor específico pode ser estimado pela expressão seguinte:

$$c_F = 1750 \times pb_F + 760 \times (1 - pb_F) \quad (2.16)$$

Para valores correntes da percentagem de betume, obtêm-se valores de c_F entre 800 J/kg/°C e 820 J/kg/°C. Por exemplo, para uma percentagem de betume de 5% do material fresado chega-se a um calor específico de 809,5 J/kg/°C. Além do calor específico, será também necessário considerar o calor de vaporização da água ($2,25 \times 10^6$ J/kg = 537 cal/kg).

Considerando então os quatro componentes iniciais em separado e a massa de água existente no material fresado ($m_h = m_F \times h$), substituindo Q_h (2.13) em (2.15), obtém-se para estimativa da temperatura final da MBRQ:

$$T_m = \frac{\sum_{i=1}^n m_i \times c_i \times T_i}{\sum_{i=1}^n m_i \times c_i} - \frac{m_F \times h \times c_h \times (100 - T_F) + m_F \times h \times l_v}{\sum_{i=1}^n m_i \times c_i} - \Delta T_m \quad (2.17)$$

ou,

$$T_m = T'_m - \Delta T_h - \Delta T_m \quad (2.18)$$

Na equação (2.18), T'_m corresponde à temperatura que se obteria se o sistema fosse perfeitamente isolado e os materiais não apresentassem humidade:

$$T'_m = \frac{\sum_{i=1}^n m_i \times c_i \times T_i}{\sum_{i=1}^n m_i \times c_i} \quad (2.19)$$

A segunda parcela, ΔT_h , representa as perdas de calor devido à evaporação da água existente no material fresado (2.20) e ΔT_m traduz as restantes perdas de calor na obtenção da mistura reciclada.

$$\Delta T_h = \frac{m_F \times h \times [c_h \times (T_F - 100) - l_v]}{\sum_{i=1}^n m_i \times c_i} \quad (2.20)$$

Dividindo o numerador e o denominador das fracções das equações anteriores, (2.19) e (2.20), pela massa total da mistura, obtém-se:

$$T'_m = \frac{\sum_{i=1}^n p_i \times c_i \times T_i}{\sum_{i=1}^n p_i \times c_i} \quad (2.21)$$

$$\Delta T_h = \frac{p_F \times h \times [c_h \times (T_F - 100) - l_v]}{\sum_{i=1}^n p_i \times c_i} \quad (2.22)$$

A equação (2.17) é de aplicabilidade geral ao caso das MBRQ e pode ser resolvida em ordem à temperatura de aquecimento dos agregados, T_a , impondo a temperatura da mistura final, T_m , e conhecidas as restantes variáveis intervenientes.

A constante ΔT_m pode ser calibrada com base em registos do fabrico das misturas. Assim, conhecida a composição da mistura, a humidade do material fresado, a temperatura inicial dos componentes e a temperatura final da mistura betuminosa, calcula-se ΔT_m usando a seguinte equação:

$$\Delta T_m = T'_m - \Delta T_h - T_m \quad (2.23)$$

Seguindo a metodologia simplificada, pode transformar-se a expressão (2.17), tendo em conta o que já foi dito antes sobre os componentes betume e filer.

$$T_m = \frac{m_a \times c_a \times T_a + m_F \times c_F \times T_F}{m_a \times c_a + m_F \times c_F} + \frac{m_F \times h \times [c_h \times (T_F - 100) - l_v]}{m_a \times c_a + m_F \times c_F} - \Delta T_m \quad (2.24)$$

Considere-se a relação entre a massa de material fresado e a massa de agregados (excepto filer), R , dada pela equação seguinte.

$$R = \frac{m_F}{m_a} = \frac{p_F}{p_a} \quad (2.25)$$

A equação (2.24) pode então simplificar-se:

$$T_m = \frac{c_a \times T_a + R \times c_F \times T_F}{c_a + R \times c_F} + \frac{R \times h \times [c_h \times (T_F - 100) - l_v]}{c_a + R \times c_F} - \Delta T_m \quad (2.26)$$

Como os calores específicos dos agregados e do material fresado são muito próximos, admitindo $c_a \approx c_F$, obtém-se:

$$T_m = \frac{T_a + R \times T_F}{1 + R} + \frac{R \times h \times [c_h \times (T_F - 100) - l_v]}{(1 + R) \times c_F} - \Delta T_m \quad (2.27)$$

que tendo em conta as constantes da água, c_h e l_v , e do material fresado, c_F , se simplifica para :

$$T_m \cong \frac{T_a + R \times T_F + 5 \times R \times h \times (T_F - 637)}{1 + R} - \Delta T_m \quad (2.28)$$

e que resolvida em ordem a T_a conduz à expressão:

$$T_a = (T_m + \Delta T_m) \times (1 + R) - R \times T_F + 5 \times R \times h \times (637 - T_F) \quad (2.29)$$

ou

$$T_a = T_m \times (1 + R) - R \times T_F + 5 \times R \times h \times (637 - T_F) + \Delta T_a \quad (2.30)$$

com,

$$\Delta T_a = \Delta T_m \times (1 + R) \quad (2.31)$$

onde,

T_a - temperatura de aquecimento dos agregados (°C);

T_m - temperatura final da mistura betuminosa (°C);

ΔT_m - factor de correcção de T_m devido às perdas de calor (°C);

ΔT_a - factor de correcção de T_a devido às perdas de calor (°C);

R - relação entre a massa de material fresado e a massa dos agregados novos;

T_F - temperatura inicial do material fresado (°C);

h - humidade do material fresado.

- Exemplos de aplicação

Admita-se o fabrico duma MBRQ em central descontínua com uma taxa de reciclagem de 30%, 2,5% de filer, 3,5% de betume novo e percentagem de agregado novo de 64%. O material fresado, com uma humidade de 2%, é introduzido a frio (20°C) na unidade de mistura. A relação entre a massa de material fresado e a massa de agregados é de:

$$R = \frac{0,30}{0,64} = 0,47$$

Admitindo que as perdas de calor na central correspondem a uma correcção ΔT_a de 10°C , usando a expressão (2.30), para obter uma temperatura final de 150°C , a temperatura de aquecimento dos agregados será:

$$T_a = 150 \times (1 + 0,47) - 0,47 \times 20 + 5 \times 0,47 \times 0,02 \times (637 - 20) + 10 = 250^\circ\text{C}$$

Este valor está próximo da temperatura máxima recomendada para aquecimento dos agregados (275°C). Por esta razão, sendo o material fresado introduzido a frio e aquecido em contacto com os agregados, para ir mais além de taxas de reciclagem de 30% é necessário ter uma expectativa de temperatura final da mistura inferior a 150°C . Dependendo da taxa de reciclagem e da temperatura mínima com que se consegue fazer a compactação no local, aquele facto significa que taxas de reciclagem superiores a 30% têm de ser avaliadas com mais cuidado para haver sucesso.

Tomando como exemplo uma mistura idêntica mas com uma taxa de reciclagem de 40% (humidade do material fresado de 2%, 3,0% de betume novo, 55% de agregado novo e 2% de filer), sendo a temperatura de aquecimento dos agregados igual (250°C), obtém-se:

$$R = \frac{0,40}{0,55} = 0,73$$

$$\Delta T_m = \frac{\Delta T_a}{1 + R} = \frac{10}{1 + 0,73} = 5,8^\circ\text{C}$$

$$T_m = \frac{250 + 0,73 \times 20 + 5 \times 0,73 \times 0,02 \times (20 - 637)}{1 + 0,73} - 5,8 = 121^\circ\text{C}$$

Desta forma, em condições idênticas (TR de 40%), a temperatura final da mistura baixa de forma significativa, pelo que a taxa de reciclagem de 40% só será possível com a central próxima do local de compactação e boas condições ambiente. Refira-se que nas mesmas condições e com o material fresado seco a temperatura da mistura seria da ordem dos 146°C , muito próxima da temperatura com TR de 30% e material fresado com 2% de humidade.

Considere-se agora uma taxa de reciclagem de 70%, percentagem de agregado novo de 26%, 2,5% de filer e 1,5% de betume novo. O material fresado é previamente seco e aquecido a 120°C num tambor secador e pretende-se que a mistura apresente uma temperatura de 150°C . Nesta situação, obtém-se:

$$R = \frac{0,70}{0,26} = 2,69$$

$$T_a = 150 \times (1 + 2,69) - 2,69 \times 120 + 0 + 10 = 241^\circ \text{C}$$

A temperatura de aquecimento a que se chegou é idêntica à do primeiro caso e mostra que só aquecendo o material fresado se conseguem atingir taxas de reciclagem elevadas, da ordem dos 70%, sem com isso afectar a temperatura final da mistura.

2.6 Considerações Finais

Ao longo do capítulo abordaram-se as diferentes técnicas de reciclagem de misturas betuminosas, em central ou *in situ*, se bem que, em algumas delas, nomeadamente nas segundas, procede-se por vezes a reciclagem das camadas betuminosas e parte das camadas granulares.

No que respeita à técnica de reciclagem em central, foram descritas as diversas alternativas de fabrico em centrais contínuas e descontínuas. De salientar que nos trabalhos experimentais se usou uma central descontínua tipo torre no fabrico das MBRQ.

O estudo do equilíbrio térmico no fabrico das misturas conduziu a uma expressão teórica que permite estimar a temperatura de aquecimento dos agregados, não só em centrais de fabrico, onde o aquecimento do material fresado se faça por condução, mas também na produção de misturas recicladas em laboratório. Recorrendo à expressão (2.30) pôde ainda verificar-se os habituais limites de incorporação de material fresado nos métodos a frio (30% a 40%) e a quente (70%).

2.7 Referências Bibliográficas

- Applied Polymerics@ (2006). <http://www.appliedpolymerics.com>. Applied Polymerics, Pavement Maintenance Systems. Mont Airy, EUA.
- Batista, F. (2004). “Novas Técnicas de Reabilitação de Pavimentos. Misturas betuminosas densas a frio”. Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.
- Branco, F., Pereira, P. e Picado-Santos, L. (2005). “Pavimentos Rodoviários”. Edições Almedina (ISBN 972-40-2648-5), Coimbra.
- Brock, J. D. (2003). “Milling and Recycling”. Technical paper T-127, ASTEC, Chattanooga, USA.
- Brock, J. D. e Richmond, J. L. (2006). “Milling and Recycling” (New edition). Technical paper T-127, ASTEC, Chattanooga, USA.

- Bragança, A. e Pires, A. (2006). “Fabrico e aplicação de Misturas Recicladas a Quente em Central, na Obra de reabilitação da Auto-Estrada A1”. Actas do Seminário “Pavimentos Verdes”, organização conjunta LNEC e CRP, ed. CD, Lisboa.
- EAPA (2006). “Asphalt in Figures - 2005”. European Asphalt Pavement Association, Bruxelas, Bélgica.
- EAPA (2005). “Asphalt in Figures - 2004”. European Asphalt Pavement Association, Bruxelas, Bélgica.
- EAPA (2004). “Asphalt in Figures - 2003”. European Asphalt Pavement Association, Bruxelas, Bélgica.
- EAPA (2003). “Asphalt in Figures - 2002”. European Asphalt Pavement Association, Bruxelas, Bélgica.
- EAPA (1998). “*Directivas ambientais sobre as melhores técnicas disponíveis (BAT) para a produção de misturas betuminosas*”. Tradução da APORBET. Edição da European Asphalt Pavement Association (ISBN 90-801214-9-5), Breukelen, Holanda.
- JAE (1995). “*Manual de Concepção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional*”. Junta Autónoma de Estradas (actual EP), Almada.
- LNEC (2006). “Guia para a reciclagem de misturas betuminosas em central”. E 472-2006, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
- Martinho, F. (2004). “Reciclagem de Pavimentos - Estado da Arte, Situação Portuguesa e Selecção do Processo Construtivo”. Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da F.C.T. da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Martinho, F. e Picado-Santos, L. (2006). “As Potencialidades dos Processos de Reciclagem *in situ* a Quente na Reabilitação de Algumas Patologias dos Pavimentos Rodoviários”. Actas do IV Congresso Rodoviário Português, Centro Rodoviário Português, Ed. CD, Lisboa.
- Martinho, F. e Picado-Santos, L. (2005). “A Selecção do Processo Construtivo de Reciclagem de Pavimentos Rodoviários”, Actas do XIII Congresso Ibero-latinoamericano del Asfalto (XIII CILA), Ed. CD, San José, Costa Rica.
- Picado-Santos, L. (2005). “Reciclagem de Pavimentos Rodoviários”, *Construção Magazine*, 13 – 2º semestre, pág. 40-46.
- Ribeiro, J. (2003). “Reciclagem a Frio com Espuma Betume”. Actas das II Jornadas Técnicas de Pavimentos Rodoviários - Reciclagem de Pavimentos. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (ISBN: 972-752-062), Porto.
- Rodrigues, Z. (2006). “A experiência da Estradas de Portugal” na Reciclagem de Pavimentos”. Actas do Seminário “Pavimentos Verdes”, organização conjunta LNEC e CRP, ed. CD, Lisboa.
- Rubio, A. R. (2003). “Reciclado de mezclas bituminosas en planta en caliente: proceso, ventajas y limitaciones, empleo y perspectivas”. Carreteras (Especial Reciclado de Firmses), Revista Técnica de la Asociación Española de la Carretera, n.º 118, pp. 11-27.

- Tavares, A. e Vieira, L. (2006). “Reciclagem Semi-quente em Central. EN 244 entre Ponte de Sôr e o Entroncamento com a EN 118 (Gavião)”. Actas do Seminário “Pavimentos Verdes”, organização conjunta LNEC e CRP, ed. CD, Lisboa.
- Wirtgen (2004). “Wirtgen Cold Recycling Manual”. (ISBN: 3-936215-05-7). Wirtgen GmbH, Windhagen, Alemanha.
- Wirtgen (2003). “Material and Process Procedure Principles for the Hot Recycling”. Wirtgen GmbH, Windhagen, Alemanha.

3 FORMULAÇÃO DE MISTURAS BETUMINOSAS RECICLADAS A QUENTE

3.1 Considerações Iniciais

O processo geral de formulação de misturas betuminosas pode resumir-se aos seguintes passos fundamentais: caracterização dos materiais, estabelecimento da composição de base e escolha da fórmula para execução. No caso das misturas betuminosas recicladas a quente (MBRQ), no primeiro passo, além das características dos materiais novos, avaliam-se também as propriedades do material fresado.

Nas várias fases do processo de formulação das misturas e, também, no controlo de qualidade são consideradas determinadas propriedades dos materiais elementares e das misturas compactadas, as quais devem cumprir as exigências de conformidade estabelecidas no respectivo caderno de encargos ou nas especificações normalizadas se existirem.

Neste capítulo, depois de desenvolver os conceitos relativos à composição das misturas, definem-se as propriedades gerais dos materiais e indicam-se, para cada material, os ensaios que as permitem determinar. Normalmente, às características gerais das MBRQ compactadas e aos materiais que as constituem, aplicam-se as mesmas exigências de conformidade previstas para idênticas misturas sem incorporação de material fresado.

Contudo, a satisfação dos limites especificados não constitui, por si só, uma garantia de bom desempenho da mistura quando em serviço. Por essa razão, em alguns métodos de formulação, a avaliação das características mecânicas fundamentais das misturas betuminosas, constitui um aspecto essencial na escolha da fórmula para execução. Assim, antes da abordagem do tema central do capítulo, definem-se as principais características mecânicas das misturas e descrevem-se os ensaios de desempenho usados na avaliação das características de deformabilidade das misturas e do seu comportamento à fadiga e à deformação permanente.

Finalmente, faz-se uma breve descrição dos métodos existentes para formulação de misturas a quente, os quais se podem adaptar ao estudo das MBRQ. De seguida, descrevem-se os principais métodos de formulação de MBRQ, expõe-se o método adoptado no trabalho e apresenta-se um exemplo de aplicação.

3.2 Composição das Misturas

3.2.1 Misturas betuminosas a quente

Numa mistura betuminosa tradicional encontram-se três componentes fundamentais: ar, agregado e betume. Na Figura 3.1 esquematiza-se a composição dum mistura betuminosa compactada e indicam-se também as seguintes grandezas base (massas e volumes):

- V_v – volume de vazios (cm^3);
- V_b – volume de betume (cm^3);
- V_a – volume de agregado (cm^3);
- V_t – volume total (cm^3);
- VMA – volume de vazios no esqueleto de agregado (cm^3 ou %);
- m_b – massa de betume (g);
- m_a – massa de agregado (g);
- m_t – massa total (g).

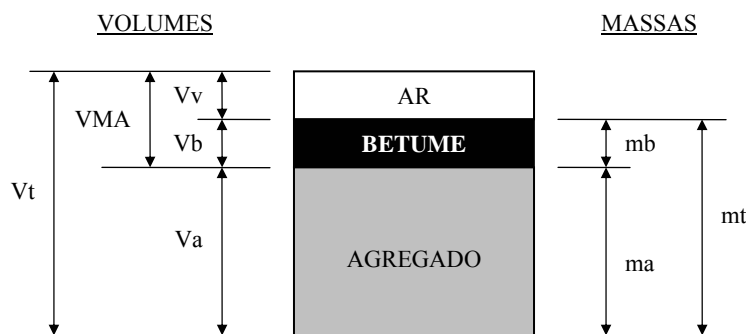


Figura 3.1 – Esquema da composição dum mistura betuminosa compactada (adaptado de Branco *et al.*, 2000)

As propriedades dum mistura betuminosa dependem das proporções relativas dos três componentes referidos e das características intrínsecas de cada um deles. Entre as grandezas mencionadas podem estabelecer-se as conhecidas relações entre massas e/ou volumes, que a seguir se apresentam tomando como referência o descrito por Branco *et al.* (2000).

ρ_a – massa volúmica do agregado (g/cm^3).

$$\rho_a = \frac{m_a}{V_a} \quad (3.1)$$

ρ_b – massa volúmica do betume (g/cm^3).

$$\rho_b = \frac{m_b}{V_b} \quad (3.2)$$

B_m – baridade da mistura ou massa volúmica da mistura (g/cm³).

$$B_m = \frac{m_t}{V_t} \quad (3.3)$$

p_a – percentagem de agregado (%).

$$p_a = \frac{m_a}{m_t} \quad (3.4)$$

p_b – percentagem de betume (%).

$$p_b = \frac{m_b}{m_t} \quad (3.5)$$

t_b – teor em betume (%).

$$t_b = \frac{m_b}{m_a} \quad (3.6)$$

n – porosidade ou volume de vazios (%).

$$n = \frac{V_v}{V_t} \quad (3.7)$$

TVB – teor volumétrico de betume ou percentagem volumétrica de betume (%).

$$TVB = \frac{V_b}{V_t} \quad (3.8)$$

v_a – percentagem volumétrica de agregado (%).

$$v_a = \frac{V_a}{V_t} \quad (3.9)$$

VMA - volume de vazios no esqueleto de agregado (%).

$$VMA = \frac{V_v + V_b}{V_t} \quad (3.10)$$

O esqueleto de agregado numa mistura betuminosa corresponde a uma mistura de agregados. Assim, a massa volúmica do agregado depende da percentagem de cada um deles na mistura, p_{a_i}, e da respectiva massa volúmica das partículas secas, ρ_{a_i} (3.11).

$$\rho_a = \frac{\sum p a_i}{\sum \frac{p a_i}{\rho a_i}} = \frac{p a}{\sum \frac{p a_i}{\rho a_i}} \quad (3.11)$$

Consideram-se ainda outras grandezas, nomeadamente a massa volúmica máxima, ou baridade máxima teórica, B_t , expressa em g/cm^3 , dada pela expressão (3.12). Em alternativa (na realidade é o processo em geral usado), a baridade máxima teórica pode determinar-se recorrendo ao picnómetro de vácuo, seguindo a norma ASTM D 2041 (ASTM, 2003-a) ou a EN 12697-5 (CEN, 2002).

$$B_t = \frac{1}{\frac{p_b}{\rho_b} + \sum \frac{p a_i}{\rho a_i}} \quad (3.12)$$

A porosidade de uma mistura betuminosa (3.13) depende da baridade máxima teórica e da baridade da mistura compactada, B_m , determinada segundo a norma ASTM D 2726 (ASTM, 2004) ou a EN 12697-6 (CEN, 2003-a).

$$n = \frac{B_t - B_m}{B_t} (\%) \quad (3.13)$$

Por fim, podem calcular-se as restantes características volumétricas da mistura compactada, TVB, VMA e grau de saturação em betume, pelas expressões seguintes.

$$\text{TVB} = \frac{p_b \times B_m}{\rho_b} (\%) \quad (3.14)$$

$$\text{VMA} = \text{TVB} + n (\%) \quad (3.15)$$

$$S_b = \frac{\text{TVB}}{\text{VMA}} (\%) \quad (3.16)$$

3.2.2 Misturas betuminosas recicladas a quente

As relações descritas, para as misturas betuminosas a quente, podem adaptar-se às misturas betuminosas recicladas a quente (MBRQ) desde que se refiram às características da mistura compactada. Na Figura 3.2 esquematiza-se a composição dum MBRQ compactada e indicam-se as grandezas base referentes aos materiais novos e aos componentes do material fresado. Os volumes indicados referem-se à mistura global e têm o mesmo significado das misturas normais, pois dizem respeito ao ar, ao ligante final (betume novo e envelhecido) e ao agregado da MBRQ (agregado novo e agregado do material fresado).

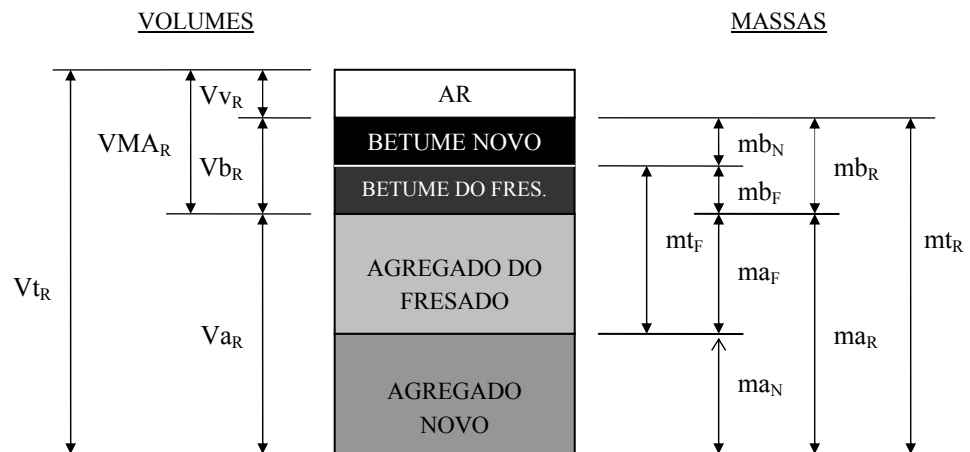


Figura 3.2 – Composição dum mistura betuminosa reciclada a quente compactada

As grandezas indicadas na figura têm o significado a seguir indicado:

- mt_R – massa total da mistura reciclada (g);
- mt_F – massa total de material fresado (g);
- ma_R – massa de agregado da mistura reciclada (g);
- ma_F – massa de agregado do material fresado (g);
- ma_N – massa de agregado novo (g);
- mb_R – massa de ligante total da mistura reciclada (g);
- mb_F – massa de ligante do material fresado (g);
- mb_N – massa de betume novo (g);
- V_{vR} – volume de vazios da mistura reciclada (cm^3);
- V_{bR} – volume de ligante da mistura reciclada (cm^3);
- V_{aR} – volume de agregado da mistura reciclada (cm^3);
- V_{tR} – volume total da mistura reciclada (cm^3);
- VMA_R – volume de vazios no esqueleto de agregado da mistura reciclada (cm^3 ou %);

Com vista à formulação de MBRQ, interessa estabelecer as seguintes relações entre massas:

pa_F – percentagem de agregado do material fresado (%).

$$pa_F = \frac{ma_F}{mt_F} \quad (3.17)$$

pa_N – percentagem de agregado novo na mistura reciclada (%).

$$pa_N = \frac{ma_N}{mt_R} \quad (3.18)$$

pa_R – percentagem de agregado da mistura betuminosa reciclada (%).

$$pa_R = \frac{ma_R}{mt_R} \quad (3.19)$$

Demonstra-se que:

$$pa_R = pa_F \times TR + pa_N \quad (3.20)$$

pb_F – percentagem de betume (ligante envelhecido) do material fresado (%).

$$pb_F = \frac{mb_F}{mt_F} \quad (3.21)$$

pb_N – percentagem de betume novo na mistura reciclada (%).

$$pb_N = \frac{mb_N}{mt_R} \quad (3.22)$$

pb_R – percentagem de betume (ligante final) da mistura betuminosa reciclada (%).

$$pb_R = \frac{mb_R}{mt_R} \quad (3.23)$$

Demonstra-se que:

$$pb_R = pb_F \times TR + pb_N \quad (3.24)$$

Podem ainda estabelecer-se as seguintes relações:

$$pa_F + pb_F = 1,0 \quad (3.25)$$

$$pa_R + pb_R = 1,0 \quad (3.26)$$

$$pa_N + pb_N = 1,0 - TR \quad (3.27)$$

A taxa de reciclagem de agregado, definida no Capítulo 2, pode também determinar-se pela expressão (3.28).

$$TRa = \frac{TR \times pa_F}{pa_R} \quad (3.28)$$

E a taxa de reciclagem de betume, também definida no Capítulo 2, usando a expressão (3.29).

$$TRb = \frac{TR \times pb_F}{pb_R} \quad (3.29)$$

A percentagem de agregado novo também se pode determinar pela expressão (3.30) obtida de (3.20), ou pela expressão (3.31).

$$pa_N = pa_R - pa_F \times TR \quad (3.30)$$

$$pa_N = pa_R \times (1 - TRa) \quad (3.31)$$

De forma análoga, a percentagem de betume novo pode determinar-se pela expressão (3.32), obtida de (3.24), ou pela expressão (3.33).

$$pb_N = pb_R - pb_F \times TR \quad (3.32)$$

$$pb_N = pb_R \times (1 - TRb) \quad (3.33)$$

3.3 Características Gerais dos Materiais Elementares e das Misturas

3.3.1 Nota introdutória

As misturas betuminosas e os materiais de base usados no seu fabrico, agregados e betume asfáltico, devem apresentar propriedades que cumpram adequadamente determinados requisitos. Regra geral, adoptam-se os mesmos critérios de exigência para as MBRQ. Nesta secção, referem-se as principais propriedades dos materiais elementares e das misturas, habitualmente tomadas como referência em Portugal nos cadernos de encargos.

No caderno de encargos da Estradas de Portugal (JAE, 1998), adiante designado por CEEP, são recomendados métodos de ensaio nacionais e estrangeiros. Além de normas portuguesas (NP) e de especificações do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), são indicadas normas americanas da *American Society for Testing and Materials* (ASTM), normas francesas da *Association Française de Normalisation* (AFNOR) e normas inglesas, as *British Standard* (BS), entre outras.

Todavia, algumas das normas referidas ao longo do trabalho, e principalmente as normas ASTM, foram adaptadas pelo *European Committee for Standardization* (CEN), existindo normas europeias (EN) relativas à caracterização dos agregados, do betume asfáltico e das misturas betuminosas, mas que ainda não foram transpostas para os cadernos de encargos em Portugal. Assim, sempre que se justifique, serão referidas as respectivas EN. Além do capítulo de pavimentação do CEEP (JAE, 1998) tomaram-se como referência as indicações de Branco *et al.* (2005) e APORBET (1998).

3.3.2 Agregados

As propriedades físicas dos agregados usados nas misturas betuminosas a quente, ou nas MBRQ, devem respeitar determinadas exigências em termos de granulometria, limpeza, resistência ao desgaste e forma das partículas, entre outras. No Quadro 3.1 indicam-se as principais propriedades dos agregados, a usar em misturas a quente, e respectivas normas de ensaio, necessárias à verificação das exigências do CEEP.

Quadro 3.1 – Principais propriedades dos agregados das misturas betuminosas consideradas no CEEP e respectivas normas de ensaio (JAE, 1998)

Propriedade	Norma/Especificação de ensaio
Granulometria	E 233 (LNEC, 1969-a)
Perda por desgaste na máquina de Los Angeles	E 237 (LNEC, 1969-b)
Índices de lamelação e alongamento	BS 812 (BSI, 1985)
Equivalente de areia da mistura de agregados (sem filer)	E 199 (LNEC, 1967)
Valor do azul de metileno (material inferior a 0,075 mm)	NF P 18-592 (AFNOR, 1990)
Absorção de água por fracção componente	NP 954; NP 581 (IGPAI, 1973, 1969)
Coefficiente de polimento acelerado	Procedimento LNEC

A granulometria dos agregados seleccionados permite estabelecer a chamada composição granulométrica, de modo a que a mistura de agregados da mistura cumpra o fuso granulométrico previsto para a mistura em estudo. No CEEP são definidos, para cada tipo de mistura, valores mínimos para o equivalente de areia da mistura de agregados (excepto filer comercial) e para o coeficiente de polimento acelerado. Para as restantes propriedades são especificados valores máximos.

3.3.3 Betume asfáltico

No que respeita às características do betume asfáltico de destilação directa, o CEEP recomenda que as mesmas deverão respeitar a especificação LNEC E 80 (LNEC, 1997). Esta especificação incorporou algumas das recomendações do projecto de norma europeia prEN 12591:1996, mais tarde aprovada como EN 12591 (CEN, 1999-a). No Quadro 3.2 indicam-se as propriedades do betume previstas na E 80 e os respectivos métodos de ensaio.

À semelhança da norma europeia (EN 12591), na LNEC E 80 os betumes asfálticos são classificados de acordo com os limites da penetração a 25°C. No Quadro 3.3 indicam-se as exigências de conformidade para os betumes previstos na referida especificação. Em Portugal, nas misturas betuminosas a quente são normalmente empregues os betumes de pavimentação 35/50 ou 50/70, e nas misturas de alto módulo o betume 10/20. Regra geral, admite-se que as propriedades do betume são asseguradas no processo de produção, sendo habitual verificar apenas as propriedades mais simples, como por exemplo a penetração a 25°C, segundo a ASTM D 5 (ASTM, 1997-a) ou a EN 1426 (CEN, 1999-b), e a temperatura de amolecimento de acordo com a ASTM D 36 (ASTM, 1995-a) ou a EN 1427 (CEN, 1999-c).

Quadro 3.2 – Principais propriedades dos betumes asfálticos e respectivos métodos de ensaio (LNEC, 1997)

Propriedade		Norma de ensaio ASTM	Norma de ensaio europeia
Penetração a 25°C (10 ⁻¹ mm)		D 5 (ASTM, 1997-a)	EN 1426 (CEN, 1999-b)
Temperatura de amolecimento (°C)		D 36 (ASTM, 1995)	EN1427 (CEN, 1999-c)
Viscosidade cinemática a 135°C (cSt)		D 2170 (ASTM, 2001-a)	EN 12595 (CEN, 1999-d)
Solubilidade em tolueno ou xileno (%)		D 2042 (ASTM, 2001-b)	EN 12592 (CEN, 1999-e)
Temperatura de inflamação (°C)		D 92 (ASTM, 2002-a)	EN 2592 (CEN, 2001)
Resistência ao endurecimento (RTFOT ou TFOT)	Variação de massa (%)	D 2872 (ASTM, 1997-b) (método RTFOT)	EN 12607-1 (CEN, 1999-f) (método RTFOT)
	Penetração residual (%)		
	Temperatura de amolecimento (°C)	D 1754 (ASTM, 1997-c) (método TFOT)	EN 12607-2 (CEN, 1999-g) (método TFOT)
	Aumento da temp. amolecimento (°C)		

Quadro 3.3 – Tipos de betumes de pavimentação, propriedades e exigências de conformidade (LNEC, 1997)

Propriedade		10/20	20/30	35/50	50/70	70/ 100	100/ 150	160/ 220	220/ 330
Penetração a 25°C	Mín.	10	20	35	50	70	100	160	220
	Máx.	20	30	50	70	100	150	220	330
Temperatura de amolecimento (°C)	Mín.	63	55	50	46	43	39	35	30
	Máx.	76	63	58	54	51	47	43	38
Viscosidade cinemática a 135°C (cSt)	Mín.	1000	530	370	295	230	175	135	100
Solubilidade em tolueno ou xileno (%)	Mín.	99	99	99	99	99	99	99	99
Temperatura de inflamação (°C)	Mín.	250	240	240	230	230	230	220	220
Resistência ao endurecimento (RTFOT ou TFOT)	Variação de massa (%)	Máx.	0,5	0,5	0,5	0,5	0,8	0,8	1,0
	Penetração residual (%)	Mín.	60	55	53	50	46	43	37
	Temp. amolecimento (°C)	Mín.	65	57	52	48	45	41	37
	Aumento temp. amolec. (°C)	Máx.	8	10	11	11	11	12	12

Na E 80 são consideradas duas possibilidades de envelhecimento do ligante: o método RTFOT (*rolling thin-film oven test*), norma ASTM D 2872 (ASTM, 1997-b) e o método TFOT (*thin-film oven test*), norma ASTM D 1754 (ASTM, 1997-c). Estes processos estão normalizados na EN 12607-1 (CEN, 1999-f) e na EN 12607-2 (CEN, 1999-g), respectivamente, e traduzem o envelhecimento que o ocorre durante o processo de fabrico das misturas.

Existe ainda outro processo para simular o envelhecimento do betume quando em serviço recorrendo ao vaso de envelhecimento sob pressão (PAV, *Pressure Ageing Vessel*), como previsto na ASTM D 6521 (ASTM, 2003-b) ou na EN 14769 (CEN, 2005-a).

Nos Estados Unidos da América (EUA) os betumes podem ser classificados de acordo com os limites de penetração a 25°C, segundo os limites da viscosidade a 60°C ou pelo grau de desempenho PG (*performance grade* na terminologia americana). A primeira classificação, prevista na norma ASTM D 946 (ASTM, 1982), é semelhante à adoptada na LNEC E 80, sendo considerados os betumes 40/50, 60/70, 85/100, 120/150 e 200/300.

A norma ASTM D 3381 (ASTM, 1992-a) preconiza a classificação dos betumes de acordo com a viscosidade a 60°C e indica limites relativamente à viscosidade a 135°C, penetração a 25°C, temperatura de inflamação e solubilidade do betume original, e para a viscosidade a 60°C e a ductilidade a 25°C do betume após envelhecimento por TFOT. No Quadro 3.4 indicam-se os tipos de betumes classificados desta forma.

Quadro 3.4 – Tipos de betumes de pavimentação previstos na ASTM D 3381

Propriedade	AC-2.5	AC-5	AC-10	AC-20	AC-30	AC-40
Viscosidade a 60°C (Poise)	250±50	500±100	1000±200	2000±400	3000±600	4000±800

Segundo a classificação com base nos critérios decorrentes do *Strategic Highway Research Program* (SHRP), a graduação PG, um betume classificado como **PG TxTy** será usado em condições climáticas em que a temperatura média máxima do pavimento nos sete dias consecutivos mais quentes, a 2 cm de profundidade, seja no máximo **Tx**, e a temperatura mínima à superfície do pavimento, sempre negativa, seja **Ty**. No Quadro 3.5 indicam-se todos os betumes previstos na especificação ASTM D 6373 (ASTM, 1999-a).

Quadro 3.5 – Tipos de betumes considerados nos EUA de acordo com a graduação PG

PG Tx-Ty		Temperatura alta, Tx (°C)						
		46	52	58	64	70	76	82
Temperatura baixa, Ty (°C)	-10	---	PG 52-10	---	PG 64-10	PG 70-10	PG 76-10	PG 82-10
	-16	---	PG 52-16	PG 58-16	PG 64-16	PG 70-16	PG 76-16	PG 82-16
	-22	---	PG 52-22	PG 58-22	PG 64-22	PG 70-22	PG 76-22	PG 82-22
	-28	---	PG 52-28	PG 58-28	PG 64-28	PG 70-28	PG 76-28	PG 82-28
	-34	PG 46-34	PG 52-34	PG 58-34	PG 64-34	PG 70-34	PG 76-34	PG 82-34
	-40	PG 46-40	PG 52-40	PG 58-40	PG 64-40	PG 70-40	---	---
	-46	PG 46-46	PG 52-46	---	---	---	---	---

O betume original deverá apresentar uma temperatura de inflamação mínima de 230°C e uma viscosidade cinemática a 135°C não superior a 3 Pa.s. Após o endurecimento pelo método RTFOT a variação de massa não deverá exceder 1,0%. De acordo com a norma ASTM D 6373, são realizados outros ensaios com amostras de betume original, envelhecido pelo método RTFOT e envelhecido pelo PAV após RTFOT (Figura 3.3).

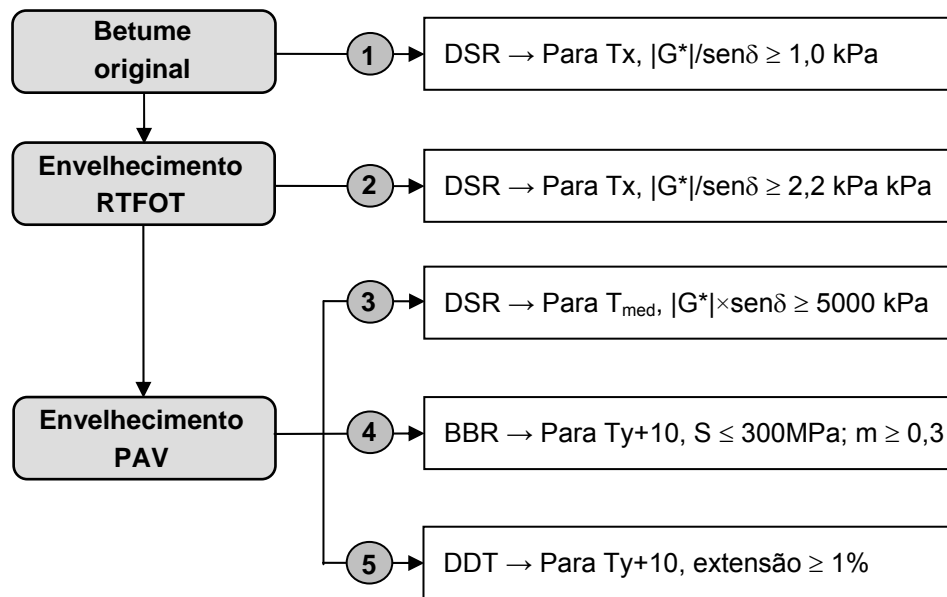


Figura 3.3 – Esquema seguido na caracterização de betumes segundo a metodologia americana

Na verificação das propriedades do betume a temperaturas de serviço altas (T_x) e médias (T_{med}), realiza-se o ensaio com o reómetro de corte dinâmico (DSR, *Dynamic Shear Rheometer* na terminologia americana) segundo a norma ASTM D 7175 (ASTM, 2005)¹. Verifica-se que a temperatura média corresponde à média dos limites da graduação PG do betume, mais 4°C, ou seja:

$$T_{med} = \frac{T_x + T_y}{2} + 4 \quad (3.34)$$

O ensaio com o DSR permite avaliar o módulo complexo (G^*) e o ângulo de fase (δ) do betume, em determinadas condições de temperatura e frequência, sendo o módulo complexo do betume dado por:

$$G^* = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \times e^{i\delta} = |G^*| \times e^{i\delta} \quad (3.35)$$

onde,

- σ_0 - amplitude da tensão induzida no betume em cada ciclo de carga (MPa);
- ε_0 - amplitude da extensão resultante no material em cada ciclo de carga;
- δ - ângulo de fase, que traduz o atraso da deformação em relação à tensão, em graus;
- $|G^*|$ - módulo ou rigidez do betume, correspondente ao valor absoluto de G^* .

¹ Este ensaio está normalizado também na EN 14770 (CEN, 2005-d)

A componente elástica do módulo complexo, G_1 , e a componente viscosa, G_2 , são dadas por:

$$G_1 = |G^*| \times \cos(\delta) \quad (3.36)$$

$$G_2 = |G^*| \times \sin(\delta) \quad (3.37)$$

Segundo a metodologia americana, na caracterização do betume a temperaturas altas, toma-se como referência o parâmetro $|G^*|/\sin\delta$, e a temperaturas médias o parâmetro $|G^*| \times \sin\delta$. Para baixas temperaturas de serviço, as propriedades do betume são verificadas 10°C acima de T_y , recorrendo ao ensaio com o reómetro de flexão dinâmica (BBR, *Bending Beam Rheometer* na terminologia americana), tal como previsto na norma ASTM D 6648 (ASTM, 2001-c)², e ao ensaio de tracção directa (DTT, *Direct Tension Test* na terminologia americana) de acordo com a norma ASTM D 6723 (ASTM, 2002-b). O betume asfáltico, a baixas temperaturas exhibe um comportamento elástico. No ensaio BBR determina-se o módulo de fluência (S) em função do tempo e a taxa de variação (m) do módulo de fluência com o tempo.

3.3.4 Material fresado

Em qualquer processo de formulação de MBRQ, os materiais elementares existentes no material fresado, agregado e o ligante envelhecido, devem ser adequadamente separados e caracterizados. O aumento da utilização de material fresado em misturas recicladas na Europa, levou o CEN a especificar o uso deste material na EN 13108-8 (CEN, 2005-b).

Em Portugal, o LNEC publicou recentemente o guia para a reciclagem de misturas betuminosas a quente em central na E 472 (LNEC, 2006). As orientações expressas nestes dois documentos serão oportunamente referenciadas no Capítulo 6. Nesta secção referem-se os principais procedimentos seguidos na caracterização do material fresado: determinação da percentagem de betume, caracterização do betume recuperado e dos agregados.

A recuperação do ligante do material fresado, para posterior caracterização, e a obtenção da correspondente percentagem de betume, faz-se como no caso das misturas betuminosas. Para o efeito existem vários métodos. No CEEP, para as misturas tradicionais, são recomendados os métodos indicados na ASTM D 2172 (ASTM, 2001-d), nomeadamente os métodos de centrifugação e de refluxo. A EN 12697-1 (CEN, 2000-a) preconiza diversos métodos, estando normalizada a recuperação de betume com evaporador rotativo, na EN 12697-3 (CEN, 2000-b), idêntica à norma ASTM D 5504 (ASTM, 2003-c), e com o fraccionador de coluna na EN 12697-4 (CEN, 2000-c).

² Este ensaio está também normalizado na EN 14771 (CEN, 2005-e)

Em alternativa, a percentagem de betume pode determinar-se, sem recurso a solventes, pelo método de incineração, como previsto na ASTM D 6307 (ASTM, 1998) ou na EN 12697-39 (CEN, 2004-a). No final do ensaio pode caracterizar-se o agregado do material fresado. Este método pode ser suficiente se for dispensada a caracterização do ligante do material fresado, o que, como se verá, acontece para taxas de reciclagem até 15% a 20%.

Mesmo para taxas de reciclagem que exijam o conhecimento das propriedades do ligante, pode recuperar-se parte do ligante usando o evaporador rotativo. Neste método, primeiro separam-se os agregados do betume por centrifugação, resultando uma solução com betume, solvente e finos. De seguida, retiram-se os finos numa centrifugadora de tubos e, por fim, separam-se o betume e o solvente sob vácuo no evaporador rotativo.

Independentemente dos métodos usados, o agregado do material fresado deverá ser caracterizado tal como os agregados novos seleccionados para a MBRQ. A caracterização do betume recuperado, nos métodos de formulação mais simples, pode resumir-se à determinação da penetração e da temperatura de amolecimento. Os métodos de formulação de MBRQ desenvolvidos nos EUA, como se verá adiante, exigem a determinação da viscosidade do betume a 60°C ou, caso da metodologia *Superpave*®, uma caracterização com base na graduação PG.

3.3.5 Misturas betuminosas compactadas

As exigências de conformidade definidas para as misturas a quente devem ser aplicadas às MBRQ. As características gerais das misturas referidas na secção 3.2 (percentagem de betume, porosidade, VMA, TVB e grau de saturação em betume), a sensibilidade à água, a relação filer/betume, entre outras, e as propriedades associadas ao método de formulação, como por exemplo a estabilidade e a deformação no método de *Marshall*, devem respeitar o especificado para a mistura em estudo. No CEEP, por exemplo, são normalmente impostos limites às propriedades das misturas indicadas no Quadro 3.6, onde constam também os respectivos métodos de ensaio.

Quadro 3.6 – Principais propriedades das misturas betuminosas consideradas no CEEP e respectivas normas de ensaio

Propriedade	Norma de ensaio ASTM	Norma Europeia
Percentagem de betume	D 2172 (ASTM, 2001-d)	EN 12697-1 (CEN, 2000-a)
Percentagem de betume (incineração)	D 6307 (ASTM, 1998)	EN 12697-39 (CEN, 2004-a)
Baridade da mistura compactada	D 2726 (ASTM, 2004)	EN 12697-6 (CEN, 2003-a)
Baridade máxima teórica	D 2041 (ASTM, 2003-a)	EN 12697-5 (CEN, 2002)
Estabilidade e deformação <i>Marshall</i>	D 1559 (ASTM, 1989)	EN 12697-34 (CEN, 2004-b)
Resistência conservada	D 1075 (ASTM, 1996)	EN 12697-12 (CEN, 2003-b)

3.4 Características Mecânicas das Misturas Betuminosas

3.4.1 Nota introdutória

Regra geral, o estudo do comportamento mecânico das misturas betuminosas, e também das MBRQ, é feito em laboratório, realizando ensaios que permitem determinar as características de deformabilidade das misturas e avaliar o seu desempenho à fadiga e à deformação permanente.

O conhecimento das propriedades mecânicas assume particular importância ao nível da formulação das misturas betuminosas e também quando se pretende dimensionar um pavimento rodoviário flexível ou estabelecer uma adequada solução numa obra de reabilitação dum pavimento. Por essa razão, nesta secção apresenta-se uma revisão sobre os principais conceitos associados às propriedades mecânicas fundamentais das misturas betuminosas.

3.4.2 Características de deformabilidade

As misturas betuminosas, ao contrário doutros materiais utilizados na construção de pavimentos rodoviários flexíveis, apresentam um comportamento muito dependente da temperatura. As camadas betuminosas, condicionadas pelo comportamento do betume asfáltico, exibem a temperaturas baixas um comportamento elástico, a temperaturas elevadas um comportamento viscoso e a temperaturas intermédias um comportamento mais representativo das condições de serviço, o visco-elástico.

Os materiais constituintes das camadas dos pavimentos rodoviários flexíveis - as misturas betuminosas e os materiais não ligados (camadas granulares e solo de fundação) - exibem um comportamento não linear e não elástico. Em geral é aceite que as misturas betuminosas apenas exibem comportamento próximo do elástico linear para temperaturas abaixo dos 15°C. No entanto, o comportamento elástico linear dos materiais, devido à sua simplicidade e facilidade de utilização na análise de tensões e deformações, é correntemente adoptado no dimensionamento de pavimentos flexíveis para toda a gama de temperaturas de serviço.

Assumindo o comportamento elástico linear na análise estrutural de pavimentos flexíveis, cada um dos materiais é caracterizado pelo módulo de elasticidade e pelo coeficiente de Poisson. Contudo, como se verá adiante, o módulo de deformabilidade, uma das propriedades mecânicas fundamentais das misturas betuminosas, não é bem igual ao módulo de elasticidade.

Na prática, as camadas que constituem a estrutura dum pavimento flexível estão sujeitas às cargas rolantes dos veículos, o que se traduz em leis de variação com o tempo, da tensão e da extensão, com um andamento semelhante ao representado na Figura 3.4.

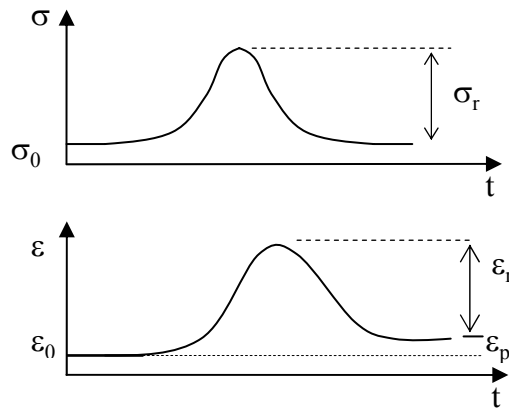


Figura 3.4 – Resposta a tensão vertical de carga rolante em pavimento rodoviário

A relação entre o acréscimo de tensão aplicada, σ_r , devido à carga rolante, e a extensão elástica recuperável, ϵ_r , traduz a capacidade de degradação de cargas da mistura betuminosa e designa-se por módulo de deformabilidade, E_m , o qual é de forma simplificada considerado como o módulo de elasticidade.

$$E_m = \frac{\sigma_r}{\epsilon_r} \quad (3.38)$$

O módulo de deformabilidade das misturas betuminosas depende da temperatura a que as mesmas se encontram, da frequência de carregamento, f , das características dos materiais que as constituem e da sua própria composição. A medição das características de deformabilidade das misturas é habitualmente feita recorrendo a ensaios com aplicação de cargas repetidas, nos quais se aplica uma tensão variável ciclicamente ao longo do tempo, com determinada frequência angular de carregamento, $\omega = 2 \pi f$, e que se rege pela expressão:

$$\sigma(t) = \sigma_r \times \text{sen}(\omega \times t) \quad (3.39)$$

Como se observou (Figura 3.4), existe um desfasamento entre a carga e a resposta do material. Nos ensaios com aplicação de cargas repetidas, o desfasamento entre as ondas de tensão e de extensão designa-se ângulo de fase, ϕ . O valor desta grandeza constitui um indicador do comportamento elástico ou viscoso do material. Num material puramente elástico a resposta é imediata e não existe qualquer desfasamento entre as ondas de tensão e de extensão, sendo nesse caso ϕ nulo. No limite, um material puramente viscoso apresenta ϕ igual a 90° .

A resposta do material à solicitação $\sigma(t)$ é uma extensão sinusoidal, $\epsilon(t)$, com igual período e frequência, mas atrasada de ϕ em relação à tensão aplicada:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_r \times \text{sen}(\omega \times t - \phi) \tag{3.40}$$

Na Figura 3.5 representa-se o andamento típico das sinusóides de tensão (a vermelho) e de extensão (a azul), características dos ensaios com aplicação de cargas repetidas, para comportamento elástico ($\phi = 0^\circ$), comportamento viscoso ($\phi = 90^\circ$) e ainda um exemplo de comportamento visco-elástico ($\phi = 45^\circ$). As correspondentes curvas histeréticas tensão-extensão apresentam-se na Figura 3.6. No entanto, a experiência mostra que, em condições normais de serviço, só para temperaturas de serviço altas o ângulo de fase das misturas betuminosas atinge valores superiores a 45° .

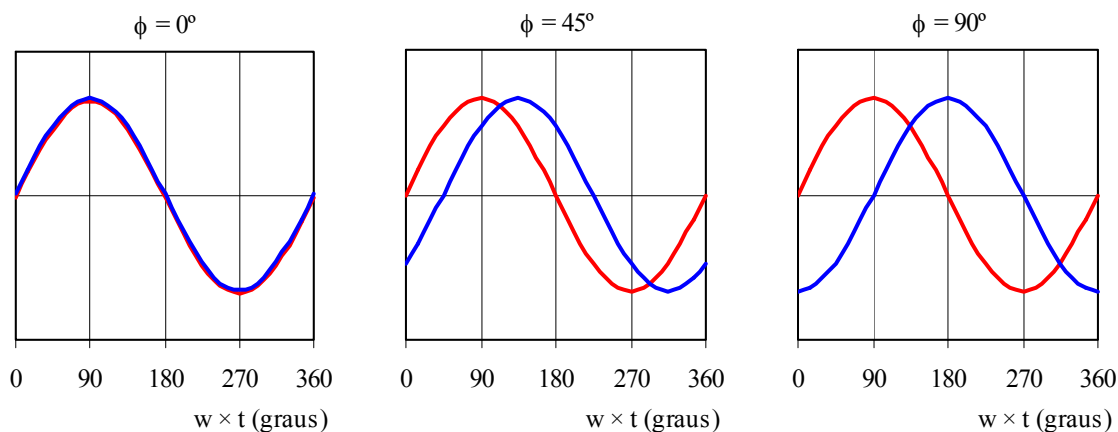


Figura 3.5 – Curvas sinusoidais de tensão e extensão (ângulos de fase de 0° , 45° e 90°)

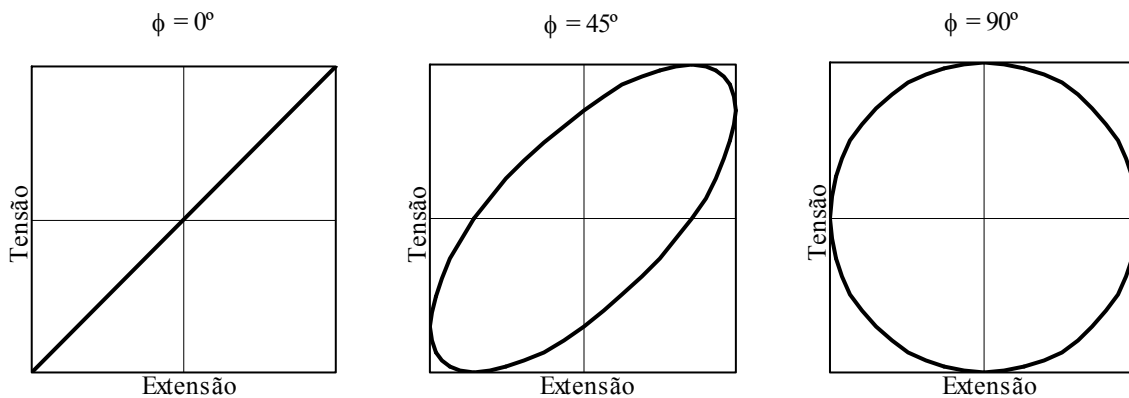


Figura 3.6 – Curvas histeréticas tensão-extensão (ângulos de fase de 0° , 45° e 90°)

A aplicação dos ciclos de carga às misturas betuminosas, desde que ocorra no domínio das pequenas deformações (extensão até 100 microns é um limite que se pode aceitar) não provoca alterações no andamento das sucessivas curvas histeréticas, “observando-se” uma sobreposição dos ciclos da curva histerética ao longo do ensaio. Neste caso, as leis sinusoidais da tensão e da extensão são válidas, definindo-se o módulo complexo, E^* , dado pela equação:

$$E^* = \frac{\sigma_r}{\varepsilon_r} \times e^{i\phi} \quad (3.41)$$

O módulo complexo define as propriedades elásticas dum material visco-elástico linear sujeito a um carregamento sinusoidal. O módulo de deformabilidade corresponde ao valor absoluto do módulo complexo que pode ser escrito da seguinte forma (CEN, 2004-c):

$$E^* = E_1 + i \times E_2 = |E^*| \times [\cos(\phi) + i \times \sin(\phi)] \quad (3.42)$$

O módulo tem assim duas componentes: a parte real (ou elástica), E_1 , e a parte imaginária (ou viscosa), E_2 . A primeira representa a energia armazenada no material, que pode ser recuperada, e E_2 representa a energia perdida por atrito interno no seio do material. Os valores das componentes do módulo complexo dependem do seu valor absoluto e do ângulo de fase:

$$E_1 = |E^*| \times \cos(\phi) \quad (3.43)$$

$$E_2 = |E^*| \times \sin(\phi) \quad (3.44)$$

Conhecidas as componentes do módulo complexo, E_1 e E_2 , pode determinar-se o valor absoluto do módulo complexo, ou módulo de deformabilidade, e o ângulo de fase.

$$|E^*| = E_m = \sqrt{(E_1)^2 + (E_2)^2} \quad (3.45)$$

$$\phi = \arctg\left(\frac{E_2}{E_1}\right) \quad (3.46)$$

As características de deformabilidade fundamentais (E_m e ϕ) medem-se a partir dos resultados dos ensaios de cargas repetidas. No que respeita ao coeficiente de Poisson, a sua parte imaginária é reduzida, podendo para materiais betuminosos ser tratado como real, variando o seu valor entre 0,3 e 0,5, conforme a frequência e a temperatura de ensaio, e admitindo que o material não sofre variação de volume (Di Benedetto *et al.*, 1998). Habitualmente adopta-se o valor de 0,35 para coeficiente de Poisson das misturas betuminosas (Branco *et al.*, 2005), não sendo o mesmo objecto de avaliação experimental no presente trabalho.

3.4.3 Comportamento à fadiga e à deformação permanente

As estruturas dos pavimentos rodoviários são submetidas, ao longo da sua vida útil, a acções extremamente variáveis (o tráfego e a temperatura) que afectam as propriedades mecânicas das camadas betuminosas. Como se viu, as principais características de deformabilidade das misturas betuminosas (E_m e ϕ) são muito condicionadas pela temperatura. A frequência de

aplicação das cargas, que se relaciona com a velocidade do tráfego pesado, também condiciona o desempenho das misturas, principalmente o seu módulo de deformabilidade.

Os principais mecanismos de degradação das camadas betuminosas, que surgem devido às acções do tráfego e da temperatura, são o fendilhamento por fadiga e as deformações permanentes. Podem apontar-se outras formas de degradação, nomeadamente o fendilhamento devido à rotura frágil das misturas, que pode ocorrer a temperaturas muito baixas, e o fendilhamento por contracção devido a variações térmicas significativas. Todavia, dadas as condições climáticas do nosso país, estas últimas formas de degradação não são relevantes quando comparadas com o fendilhamento por fadiga e as deformações permanentes.

O fendilhamento por fadiga ocorre quando as misturas betuminosas exibem comportamento visco-elástico, mas em que predomina claramente a componente elástica, sendo a parte real (ou elástica) do módulo de deformabilidade, E_1 , superior à parte imaginária (ou viscosa), E_2 . Nesta fase, que ocorre para temperaturas de serviço baixas ou moderadas, as camadas betuminosas suportam razoavelmente bem a aplicação repetida de esforços de tracção. Contudo, a aplicação dum número significativo de carregamentos origina uma perda de resistência das camadas betuminosas por fadiga e o seu fendilhamento progressivo.

Este fenómeno tende a ocorrer tanto mais rapidamente quanto mais elevados forem os esforços de tracção instalados. Assim, a resistência à fadiga depende do estado de tensão induzido, pelo que as leis de comportamento à fadiga obtidas em laboratório, regra geral, relacionam a extensão máxima de tracção induzida, ε_t , com o correspondente número de aplicações de carga que conduz à ruína do material por fadiga, N , através duma equação do tipo:

$$\varepsilon_t = A \times N^B \quad (3.47)$$

Caso se pretenda usar em dimensionamento a lei de fadiga obtida em laboratório, a vida à fadiga obtida, expressa pelo número máximo de aplicações de carga, N , e correspondente a determinada extensão de tracção, deve ser corrigida de modo a levar em consideração alguns aspectos difíceis de reproduzir em laboratório, nomeadamente os períodos de repouso que ocorrem no pavimento entre carregamentos, o tempo real de propagação do fendilhamento através das camadas betuminosas e, ainda, o facto dos rodados dos veículos pesados não actuarem sempre no mesmo local.

A avaliação da resistência à fadiga é igualmente importante quando inserida num processo de formulação de misturas betuminosas. Nesta perspectiva, na interpretação dos resultados, além da comparação das leis de fadiga obtidas, usa-se com frequência o parâmetro ε_6 que

representa a extensão de tração necessária para provocar a ruína por fadiga ao fim de um milhão de ciclos.

A rotura devido à fadiga das misturas, como se referiu, ocorre sobretudo a temperaturas baixas a moderadas, quando as camadas betuminosas apresentam um comportamento visco-elástico com forte componente elástica, pelo que, no nosso país, se estuda a resistência à fadiga para temperaturas entre 20°C e 25°C.

As deformações permanentes, que ocorrem à superfície dos pavimentos flexíveis, podem ter a sua origem nas camadas betuminosas e/ou no solo de fundação. Os cavados de rodeira que se desenvolvem na zona de passagem dos veículos, podem surgir em pavimentos flexíveis sujeitos a tráfego muito intenso e com fundação de elevada capacidade de suporte, constituídos por camadas granulares pouco espessas e por camadas betuminosas de elevada espessura (Branco *et al.*, 2005).

Porém, apesar dos critérios de ruína usados em dimensionamento, na verificação à deformação permanente, apenas levarem em conta a contribuição da fundação para a ocorrência dos cavados de rodeira, tem-se verificado que a contribuição das camadas betuminosas também pode ser significativa, nomeadamente em situações de tráfego pesado intenso, agressivo (com cargas por eixo elevadas) e com velocidade de circulação reduzida.

Desta forma, assume uma importância fundamental que se avaliem as características mecânicas das misturas betuminosas, não só ao nível do comportamento à fadiga, mas também em termos de resistência à deformação permanente. Ora, as deformações permanentes, com origem nas camadas betuminosas, ocorrem nas condições descritas e essencialmente a temperaturas elevadas, quando o módulo de deformabilidade das misturas é baixo e existe um predomínio da parte viscosa no seu comportamento. Nestas condições, podem surgir as referidas deformações permanentes, nas zonas de passagem dos rodados dos veículos, devido à sucessiva aplicação das cargas.

De acordo com a equação (3.46), a parte viscosa do módulo de deformabilidade, E_2 , é superior à parte elástica, E_1 , quando o ângulo de fase, ϕ , for superior a 45°. Verifica-se que este limite ocorre a temperaturas elevadas e que dependem principalmente do tipo de betume usado na mistura. Assim, uma mistura betuminosa em que se use um ligante mais duro tenderá a apresentar $\phi = 45^\circ$ a uma temperatura mais elevada, comparativamente a uma mistura produzida com um betume mais brando. Por esta razão, devem usar-se betumes mais duros nas zonas quentes e betumes mais brandos nas zonas temperadas.

Desta forma, a temperatura a usar no estudo do comportamento à deformação permanente das misturas betuminosas, acaba por ser definida em função das condições climáticas do local da

obra e do tipo de betume usado na mistura. Nesse sentido, Freire (2002) propôs que, para Portugal Continental, a temperatura a adoptar na caracterização do comportamento à deformação permanente de misturas betuminosas se situe entre 40°C e 50°C, em função da zona climática onde se localiza o pavimento. Tomando como referência as quatro zonas climáticas propostas por Baptista e Picado-Santos (2002), ilustradas na Figura 3.7, a autora recomendou as temperaturas indicadas no Quadro 3.7.

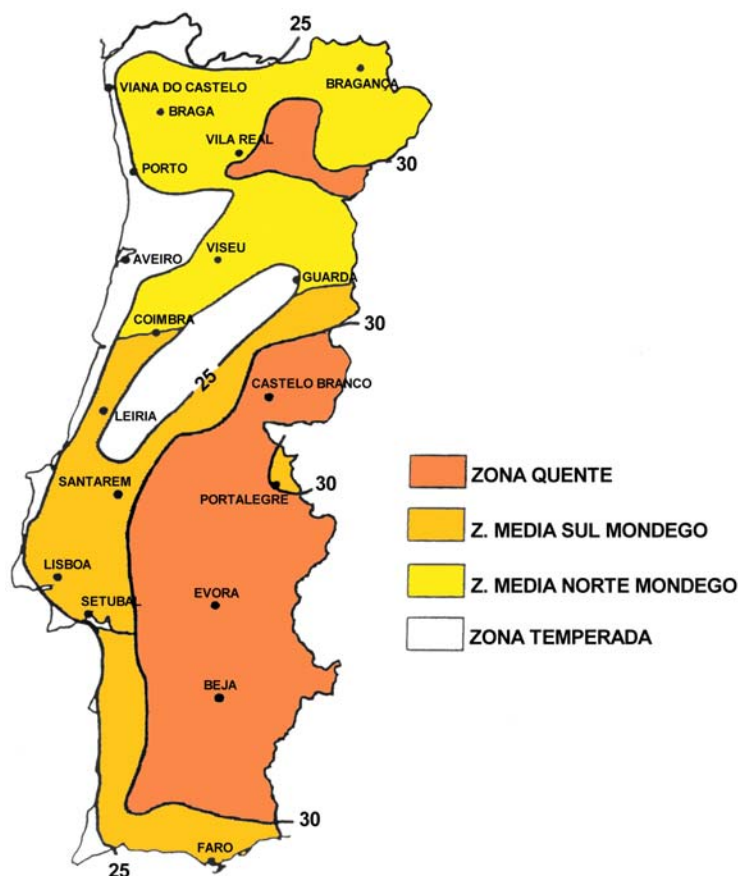


Figura 3.7 – Zonas climáticas de Portugal Continental (Baptista e Picado-Santos, 2002)

Quadro 3.7 – Temperaturas para avaliação da resistência à deformação permanente em Portugal Continental

Zona climática	Temperatura
Zona quente	50°C
Zona média sul do Mondego e zona média norte do Mondego	45°C
Zona temperada	40°C

3.4.4 Factores que influenciam as características mecânicas das misturas

As propriedades fundamentais das misturas betuminosas dependem dum conjunto de factores, uns ligados às solicitações e outros associados à composição das misturas. Por um lado, o desempenho das misturas é condicionado pela acção do tráfego e da temperatura. Assim, os

resultados a que se chega em laboratório, para determinado tipo de ensaio, dependem das condições de ensaio adoptadas (temperatura, frequência de carregamento e estado de tensão). Por outro lado, alguns parâmetros das misturas, como sejam o tipo e a quantidade de betume, as características do agregado e a porosidade da mistura, influenciam também o seu comportamento.

No caso das misturas recicladas a quente, acresce que as características do material fresado e a taxa de reciclagem influenciam principalmente as características de deformabilidade. No Capítulo 5 faz-se uma análise dos resultados dos ensaios de desempenho e estuda-se a influência destes e doutros factores nas características das MBRQ.

3.5 Ensaio de Caracterização Mecânica das Misturas Betuminosas

3.5.1 Nota introdutória

Os ensaios laboratoriais de avaliação das características mecânicas das MBRQ são essencialmente os mesmos a que se recorre para caracterizar as misturas betuminosas tradicionais. Além das características de deformabilidade, faz-se a avaliação da resistência à fadiga e à deformação permanente.

Estes ensaios são realizados em condições o mais próximas possível das observadas nos pavimentos quando em serviço, nomeadamente no que respeita à temperatura, ao tempo de carregamento e ao estado de tensão.

Nesta secção descrevem-se os ensaios laboratoriais mais utilizados na caracterização mecânica das misturas betuminosas. Uma descrição mais detalhada dos mesmos pode ser consultada em trabalho de investigação realizado por Capitão (2003), que, em alguns aspectos, se tomou com referência no que a seguir se apresenta.

3.5.2 Ensaio de avaliação das características de deformabilidade e da resistência à fadiga

Os ensaios de avaliação do módulo de deformabilidade e do ângulo de fase, regra geral são ensaios não destrutivos por se realizarem no domínio das pequenas deformações (extensões baixas) e por se aplicarem poucos ciclos de carga. Pode assim dizer-se que, não existindo degradação do material, o comportamento será aproximadamente elástico linear e as amplitudes da carga e da deformação serão praticamente constantes ao longo do ensaio (tensão e extensão constantes).

Nos ensaios de avaliação da resistência à fadiga, a sucessiva aplicação de cargas provoca uma degradação do material consubstanciada numa redução do módulo de deformabilidade ao longo do ensaio. Os ensaios de fadiga, que são do tipo destrutivo, podem realizar-se em extensão controlada ou em tensão controlada (Figura 3.8).

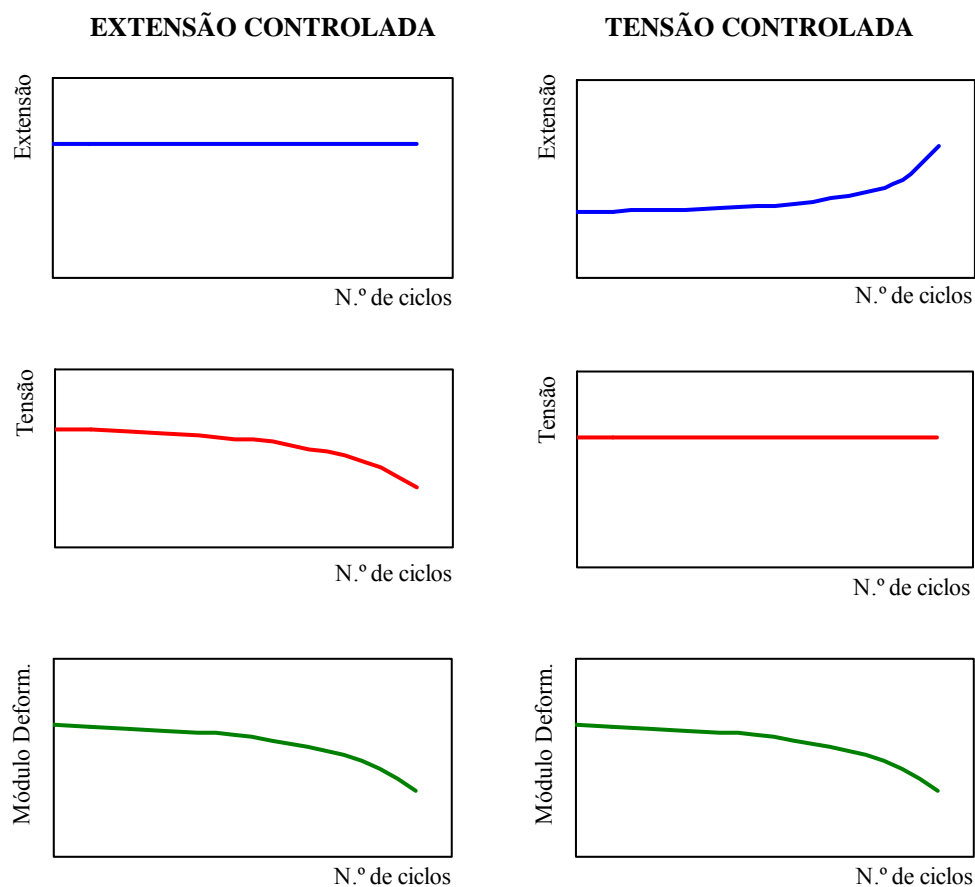
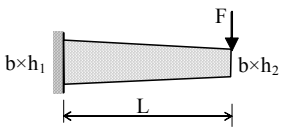
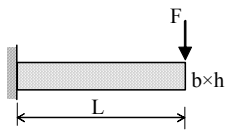
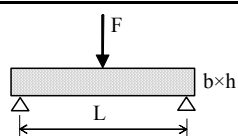
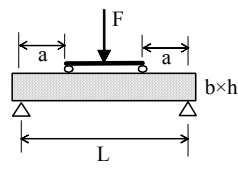
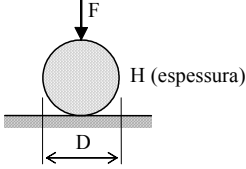


Figura 3.8 – Evolução típica da tensão, da extensão e do módulo de deformabilidade, em ensaios de fadiga em extensão controlada e em tensão controlada

Nos ensaios realizados em extensão controlada é imposta a amplitude do deslocamento, correspondente à extensão pretendida, decrescendo a tensão no decorrer do ensaio. Nos ensaios com extensão controlada o critério mais usual passa por terminar o ensaio quando se regista uma redução de 50% no valor do módulo de deformabilidade da mistura, traduzida numa igual diminuição da amplitude da carga. Nos ensaios em tensão controlada é imposta a amplitude de carga correspondente à tensão pretendida, observando-se o aumento da extensão durante o ensaio. Neste caso, o final do ensaio coincide com a rotura do provete.

Os ensaios de avaliação das características de deformabilidade e de resistência à fadiga podem dividir-se em três grupos (Di Benedetto *et al.*, 1998): ensaios de flexão, ensaios de tracção-compressão e ensaios de corte. Tomando como referência a EN 12697-26, *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt – Part 26: Stiffness* (CEN, 2004-c) e a EN 12697-24, *Bituminous mixtures - Test Methods for hot mix asphalt – Part 24: Resistance to fatigue* (CEN, 2004-d), passam a descrever-se os principais tipos de ensaios utilizados e simultaneamente previstos em ambas as normas europeias (Quadro 3.8).

Quadro 3.8 – Resumo dos principais tipos de ensaios de avaliação das características de deformabilidade e da resistência à fadiga

Tipo de ensaio	Tipo de provete	Designação	Esquema do ensaio
Ensaio de flexão em dois pontos	Prismático trapezoidal	2PB-TR (<i>two-point bending test on trapezoidal specimens</i>)	
Ensaio de flexão em dois pontos	Prismático rectangular (vigas)	2PB-PR (<i>two-point bending test on prismatic shaped specimens</i>)	
Ensaio de Flexão em três pontos	Prismático rectangular (vigas)	3PB-PR (<i>three-point bending test on prismatic shaped specimens</i>)	
Ensaio de flexão em quatro pontos	Prismático rectangular (vigas)	4PB-PR (<i>four-point bending test on prismatic shaped specimens</i>)	
Ensaio de tracção indirecta ou compressão diametral	Cilíndrico	IT-CY (<i>Indirect tensile test on cylindrical shaped specimens</i>)	

Nos ensaios de flexão usam-se provetes prismáticos trapezoidais ou rectangulares, estes últimos adiante designadas por vigas. Os equipamentos que permitem realizar ensaios de flexão em dois pontos (um ponto de carga e um ponto de apoio) aplicam o carregamento em consola sobre os provetes trapezoidais (2PB-TR, *two-point bending test on trapezoidal specimens*) ou sobre vigas (2PB-PR, *two-point bending test on prismatic shaped specimens*).

Nos ensaios de flexão em dois pontos, os provetes são colados na base e a carga sinusoidal é aplicada no seu topo e com determinada frequência. Várias instituições de investigação rodoviária têm estudado o comportamento das misturas betuminosas submetendo provetes prismáticos trapezoidais à flexão. São exemplo disso o LCPC - *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*, em França, o CRR - *Centre de Recherches Routières* da Bélgica e os laboratórios da *Shell*.

As dimensões da secção transversal dos provetes trapezoidais são escolhidas de modo a que a ruína se verifique sensivelmente a meio vão ($L/2$) onde a tensão é maior. A EN 12697-24 define as dimensões dos provetes trapezoidais (Quadro 3.9) e das vigas (Quadro 3.10), a usar nos ensaios de flexão em dois pontos, em função da dimensão máxima do agregado da mistura betuminosa, D_{max} . Contudo, nos ensaios 2PB-TR julga-se que a reduzida espessura do provete, h_2 , limita a dimensão máxima dos agregados, afigurando-se não ser possível ensaiar de forma minimamente representativa a maioria das misturas betuminosas aplicadas em camadas de base de pavimentos flexíveis.

Quadro 3.9 – Dimensões dos provetes trapezoidais para ensaios de flexão em dois pontos (CEN, 2004-d)

Dimensão	$D_{max} \leq 14 \text{ mm}$	$14 \text{ mm} \leq D_{max} \leq 20 \text{ mm}$	$20 \text{ mm} \leq D_{max} \leq 40 \text{ mm}$
h_1	56	70	70
h_2	25	25	30
b	25	25	50
L	250	250	250

Quadro 3.10 – Dimensões das vigas para ensaios de flexão em dois pontos (CEN, 2004-d)

Dimensão	$D_{max} \leq 22 \text{ mm}$	$D_{max} \geq 22 \text{ mm}$
h	40	80
b	40	80
L	160	320

Devido ao elevado número de ensaios que é necessário realizar para avaliar a resistência à fadiga, por vezes utilizam-se equipamentos que permitem ensaiar vários provetes em simultâneo. É o caso da máquina de fadiga que se mostra na Figura 3.9, desenvolvida na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), no Brasil (Momm, 2005), que permite ensaiar quatro provetes trapezoidais em simultâneo.



Figura 3.9 – Equipamento para ensaios de flexão da USFC - Brasil (Momm, 2005)

Existem ainda os ensaios de flexão simples em três pontos (dois pontos de apoio e um ponto de carga), com carregamento central das vigas simplesmente apoiadas (3PB-PR, *three-point bending test on prismatic shaped specimens*), e os ensaios de flexão simples em quatro pontos (dois pontos de apoio e dois pontos de carga), com carregamento em dois pontos das vigas simplesmente apoiadas (4PB-PR, *four-point bending test on prismatic shaped specimens*).

A norma europeia relativa aos ensaios de fadiga (EN 12697-24) indica que o ensaio de flexão em três pontos apenas se pode usar em misturas betuminosas com dimensão máxima do agregado de 22 mm e prevê que as vigas tenham as dimensões $300 \times 50 \times 50 \text{ mm}^3$.

No ensaio de flexão em quatro pontos, a norma recomenda que as dimensões da secção das vigas, b e h , sejam no mínimo iguais ao triplo de D_{max} e que a distância entre os apoios, L , seja igual a cerca de seis vezes o maior dos valores de b e h . Refira-se ainda que esta é a configuração da máquina de cargas repetidas usada na presente investigação (Figura 3.10) para avaliar as características de deformabilidade e de resistência à fadiga.

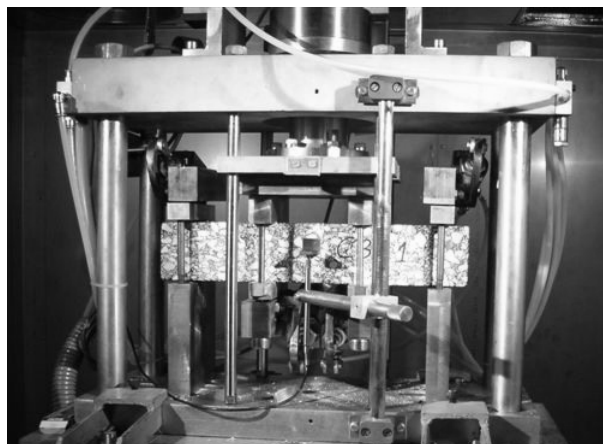


Figura 3.10 – Equipamento para realização de ensaios com aplicação de cargas repetidas (DEC-FCTUC) usado em ensaios de flexão em quatro pontos

No ensaio de flexão em quatro pontos, a parte central da viga, entre os pontos de aplicação de carga, encontra-se sujeita a momento-flector constante, o que constitui uma vantagem visto que a extensão também é constante. Existe larga experiência na utilização dos ensaios de flexão, sendo estes os principais procedimentos considerados em documentos normativos recentes (CEN, 2004-c e 2004-d). Refira-se ainda que nestes ensaios é possível avaliar as características de deformabilidade e de comportamento à fadiga numa larga escala de condições de ensaio que se observam nos pavimentos rodoviários flexíveis.

Para finalizar, no ensaio de compressão diametral ou de tracção indirecta (IT-CY, *Indirect tensile test on cylindrical shaped specimens*), realizado de acordo com a EN 12697-23 (CEN,

2003-d), os provetes cilíndricos são sujeitos a um carregamento de compressão ao longo de duas geratrizes diametralmente opostas, as quais definem um plano vertical onde se desenvolvem tensões de tracção na direcção horizontal de valor aproximadamente constante.

Desta forma, a ruína por fadiga dos provetes ocorre devido à aplicação repetida das tensões de tracção induzidas no plano definido pelas duas geratrizes de carga. A amplitude das cargas repetidas aplicadas diametralmente é constante, tratando-se assim dum ensaio realizado em tensão controlada. Na Figura 3.11 apresenta-se um esquema da montagem geralmente utilizada na realização deste tipo de ensaios.

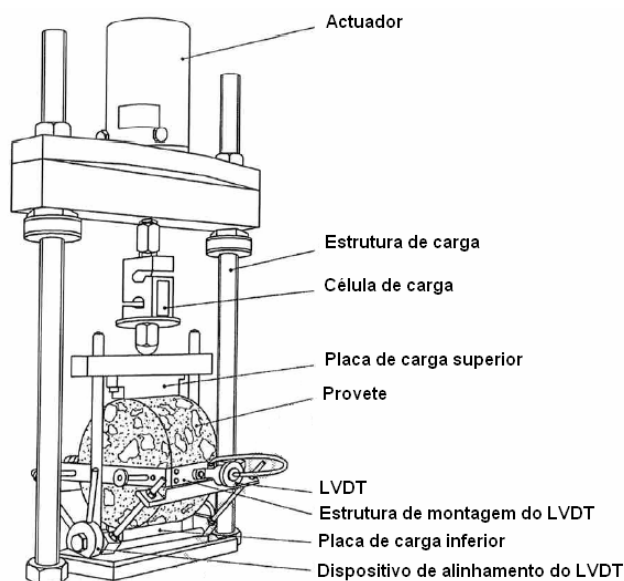


Figura 3.11 – Representação esquemática do equipamento para realização de ensaios de tracção indirecta (adaptado de CEN, 2004-c)

De acordo com a EN 12697-24, na avaliação da vida à fadiga, em misturas com D_{max} até 25 mm os provetes cilíndricos devem apresentar altura mínima de 40 mm e diâmetro de 100 mm, e em misturas com D_{max} até 38 mm a altura deverá ser no mínimo 60 mm e o diâmetro de 150 mm. Nos ensaios de avaliação do módulo de deformabilidade, a EN 12697-26 prevê espessura dos provetes cilíndricos entre 35 mm e 75 mm e diâmetros de 80 mm, 100 mm, 120 mm, 150 mm e 200 mm.

Embora se trate de um ensaio simples, são-lhe apontadas algumas desvantagens, principalmente quando usados na avaliação da resistência à fadiga. Ao sujeitar um provete cilíndrico à compressão diametral, ocorrem tensões de compressão elevadas, na zona de contacto do provete com as placas do equipamento, que podem provocar a ruína nesta parte do provete. Além disso, alguns autores referem que estes ensaios não simulam adequadamente o estado de tensão que ocorre nas camadas dos pavimentos e que, além disso,

o acumular de deformações permanentes ao longo do ensaio pode levar a que o resultado não constitua um bom indicador da resistência à fadiga (Capitão, 2003).

Nas cinco configurações referidas (2PB-TR, 2PB-PR, 3PB-PR, 4PB-PR e IT-CY), os provetes podem ser moldados em laboratório ou provenientes do pavimento. Em todos os casos, os equipamentos são normalmente usados em conjunto com uma câmara climática que permite controlar a temperatura de ensaio com precisão de $\pm 1,0^\circ\text{C}$ ou $\pm 0,5^\circ\text{C}$, conforme o tipo de ensaio (CEN, 2004-c e 2004-d).

No que respeita às condições de ensaio, a avaliação da resistência à fadiga é normalmente feita para uma frequência, uma temperatura e três níveis de extensão. Na avaliação do módulo de deformabilidade, realizado no domínio das pequenas deformações, as temperaturas podem oscilar entre os -30°C e os 40°C e pode fazer-se um varrimento da frequência de ensaio que inclua os seguintes valores: 0,1 Hz, 0,2 Hz, 0,5 Hz, 1 Hz, 2 Hz, 5 Hz, 10 Hz, 20 Hz e 50 Hz (CEN, 2004-c).

No entanto, como se verá no capítulo seguinte, neste trabalho avaliaram-se as características de deformabilidade a 15°C , 25°C e 40°C , considerando frequências de 1 Hz, 5 Hz e 10 Hz. Tomando como referência a EN 12697-26 (CEN, 2004-c), no tratamento dos resultados dos ensaios, as componentes do módulo complexo calculam-se pelas seguintes equações:

$$E_1 = C \times \left(\frac{\Delta F}{\Delta \delta} \times \cos(\phi) + \frac{\mu_m}{10^3} \times f^2 \right) \quad (3.48)$$

$$E_2 = C \times \left(\frac{\Delta F}{\Delta \delta} \times \text{sen}(\phi) \right) \quad (3.49)$$

onde,

E_1 - componente elástica ou real do módulo complexo (MPa);

E_2 - componente imaginária do módulo complexo (MPa);

ϕ - ângulo de fase (graus);

ΔF - amplitude da carga (N);

$\Delta \delta$ - amplitude do deslocamento (mm);

f - frequência de ensaio (Hz);

C - factor de forma (em mm^{-1}), dependente da forma do provete e do tipo de ensaio;

μ_m - factor de massa (em g), função da massa do provete, e da massa das partes do equipamento ligadas ao provete e que podem influenciar os resultados devido a efeitos de inércia (CEN, 2004-c).

Todavia, nos ensaios clássicos com aplicação de cargas repetidas os efeitos de inércia são desprezáveis (Di Benedetto, 1998). Assim, tendo em conta que o módulo de deformabilidade,

Em, corresponde por definição ao valor absoluto do módulo complexo, desprezando os efeitos de inércia ($\mu_m = 0$), obtém-se:

$$Em = |E^*| = \sqrt{(E_1)^2 + (E_2)^2} \cong C \times \frac{\Delta F}{\Delta \delta} \quad (3.50)$$

Para cálculo do valor do factor de forma, C, usam-se as expressões seguintes (CEN, 2004-c).

$$C = \frac{12 \times L^3}{b \times (h_1 - h_2)^3} \times \left[\left(2 - \frac{h_2}{2 \times h_1} \right) \times \frac{h_2}{h_1} - \frac{3}{2} - \ln \left(\frac{h_2}{h_1} \right) \right], \text{ no ensaio 2PB-TR} \quad (3.51)$$

$$C = \frac{4 \times L}{b \times h^3}, \text{ no ensaio 2PB-PR} \quad (3.52)$$

$$C = \frac{24 \times L^3}{\pi^4 \times b \times h^3} \approx \frac{L^3}{4 \times b \times h^3}, \text{ no ensaio 3PB-PR} \quad (3.53)$$

$$C = \frac{a \times (3 \times L^2 - 4 \times a^2)}{4 \times b \times h^3}, \text{ no ensaio 4PB-PR} \quad (3.54)$$

$$C = \frac{1}{H} \times (\mu + 0,27), \text{ no ensaio IT-CY} \quad (3.55)$$

Além dos cinco tipos de ensaios descritos, a EN 12697-26 (CEN, 2004-c) inclui ainda os ensaios de tracção-compressão em provetes cilíndricos (DTC-CY, *Direct tension-compression test on cylindrical specimens*) e os ensaios de tracção em provetes cilíndricos (DT-CY, *Test applying direct-tension to cylindrical specimens*) e em provetes prismáticos (DT-PR, *Test applying direct-tension to prismatic specimens*). Estes ensaios são pouco usados na avaliação do módulo de deformabilidade e não são considerados na avaliação da resistência à fadiga (EN 12697-24), razão por que não são aqui tratados.

3.5.3 Ensaio de avaliação da resistência à deformação permanente

O conhecimento do desempenho das misturas betuminosas à deformação permanente é particularmente importante, sendo um dos aspectos a levar em conta na formulação de misturas e no dimensionamento de pavimentos flexíveis. Os resultados dos ensaios de avaliação da resistência à deformação permanente ainda não permitem estimar com relativa segurança o comportamento que se pode esperar que venha a ocorrer no pavimento.

Porém, a análise dos resultados destes ensaios permite hierarquizar as misturas ensaiadas e aferir se são cumpridos os limites impostos a determinados parâmetros indicadores do comportamento das misturas à deformação permanente. Os ensaios que, de alguma forma, permitem avaliar o desempenho das misturas betuminosas à deformação permanente, podem

classificar-se em ensaios empíricos, ensaios fundamentais e ensaios de simulação (Freire, 2002).

O ensaio de compressão *Marshall*, realizado segundo a norma ASTM D 1559 (ASTM, 1989) ou a EN 12697-34 (CEN, 2004-b) e o ensaio de *Hveem*, pela norma ASTM D 1560 (ASTM, 1992-b), são exemplos de ensaios de natureza empírica, usados essencialmente na formulação de misturas, que consideram de forma simples a resistência à deformação permanente.

No grupo dos ensaios fundamentais podem apontar-se: o ensaio de compressão uniaxial estático (ensaio de fluência) ou com aplicação de cargas repetidas; o ensaio de compressão triaxial de cargas repetidas; o ensaio de corte com aplicação de cargas estáticas ou repetidas; e o ensaio em cilindro oco (Gardete, 2005).

Os ensaios de simulação procuram reproduzir de forma aproximada as acções do tráfego, recorrendo para isso a uma carga móvel (rodado). Podem realizar-se ensaios de simulação em laboratório (*Wheel Tracking*), com equipamento a escala reduzida, ou em pista à escala real.

Uma descrição detalhada dos ensaios acima referidos pode consultar-se em trabalhos de investigação centrados no estudo das deformações permanentes (Freire, 2002; Gardete, 2005). Aqui optou-se por abordar apenas os ensaios realizados em laboratório com vista ao estudo da resistência à deformação permanente das misturas recicladas a quente.

Nos trabalhos experimentais realizaram-se ensaios de compressão uniaxial de cargas repetidas, ensaios de compressão triaxial de cargas repetidas e ensaios com simulador de tráfego (*Wheel Tracking*). De facto, os ensaios com aplicação de cargas repetidas tendem a simular melhor o estado de tensão que ocorre num pavimento devido à acção das cargas rolantes (tráfego), que se caracteriza por um acréscimo de tensões (verticais, σ_v , horizontais, σ_h , e tangenciais, τ) com o andamento qualitativo indicado na Figura 3.12.

Os ensaios de compressão (uniaxiais e triaxiais), com aplicação de cargas repetidas, realizaram-se segundo a prEN 12697-25: 2001, tendo entretanto sido publicada, no decorrer dos trabalhos, a respectiva norma final (CEN, 2005-c). Todavia, a norma publicada (EN 12697-25) é semelhante à pré-norma, pelo que nos capítulos seguintes faz-se referência apenas à norma. No ensaio com simulador de tráfego em laboratório tomou-se como referência a EN 12697-22 (CEN, 2003-c).

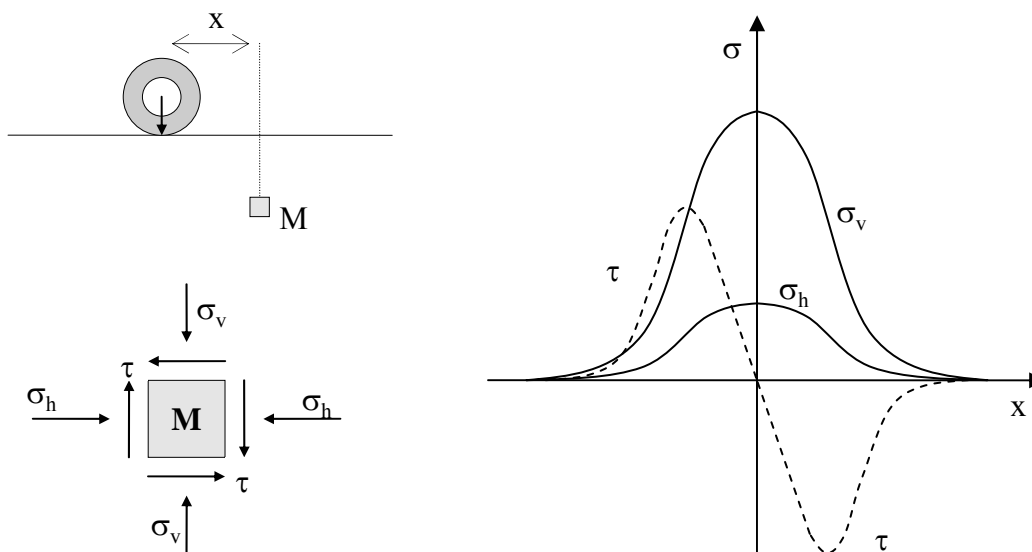


Figura 3.12 – Representação esquemática do acréscimo de tensões devido à acção de carga rolante

3.6 Métodos de Formulação de Misturas Betuminosas a Quente

3.6.1 Nota introdutória

Formular uma mistura betuminosa significa, de forma simples, estabelecer as quantidades de agregados e ligante, ou fórmula para execução, que permitem que a mistura cumpra determinadas exigências. E para que as misturas betuminosas cumpram adequadamente a sua função é essencial que se assegure uma boa qualidade, não só em termos de fabrico e colocação em obra, mas também ao nível do desempenho durante o período de serviço. Neste último aspecto, a formulação das misturas é fundamental, na medida em que a fórmula para execução seleccionada condicionará as características mecânicas da mistura.

Existem vários métodos de formulação de misturas betuminosas a quente, amplamente tratados em publicações recentes (Picado-Santos, 2005; Capitão, 2003), e que, regra geral, são adaptáveis ao estudo das MBRQ. Por essa razão, nesta secção faz-se uma breve referência às principais metodologias usadas no processo de formulação de misturas betuminosas a quente, seguindo de perto o descrito por Picado-Santos (2005).

3.6.2 Breve referência aos métodos de formulação existentes

Os métodos de formulação de misturas a quente podem classificar-se ou agrupar-se em: definidos por especificação; empíricos; analíticos; volumétricos; e racionais (Picado-Santos, 2005). Nos métodos baseados numa definição por especificação, também ditos métodos “por receita”, a constituição das misturas e os procedimentos de execução são estabelecidos em documentos normativos. As ditas “receitas” resultam da experiência acumulada na construção

rodoviária e da observação do desempenho das camadas betuminosas submetidas a diferentes solicitações de tráfego e temperatura. Em alguns países europeus, como é o caso do Reino Unido, da Alemanha e da Finlândia, a maioria das misturas betuminosas a quente são definidas desta forma. Estas metodologias, por não possibilitarem a introdução e a adaptação de novas técnicas ou materiais, e porque obrigam ao cumprimento das “receitas”, pode dizer-se que não se tratam de autênticos métodos de formulação. Todavia, identificam-se algumas vantagens associadas à uniformização dos processos.

Os métodos empíricos têm sido usados de forma generalizada em todo o mundo. Além do método de *Marshall*, norma ASTM D 1559 (ASTM, 1989), o mais conhecido, integram este grupo, o método de *Duriez*, norma francesa P 98-251-1 (AFNOR, 1992) e o método de *Hveem*, normas ASTM D 1560 (ASTM, 1992-b) e ASTM D 1561 (ASTM, 1992-d), entre outros. Refira-se que o ensaio de compressão associado ao método de *Marshall* foi recentemente normalizado pelo CEN (EN 12697-34, 2004-b). A larga experiência resultante do uso destes métodos ao longo de décadas, como ainda é o caso do método de *Marshall* em Portugal, permite estimar razoavelmente o comportamento das misturas em função da sua composição e dos parâmetros de ensaio. No entanto, os métodos empíricos não permitem medir directamente as propriedades mecânicas fundamentais e incorporam procedimentos desajustados a inovações tecnológicas e a novos materiais de pavimentação rodoviária.

Os métodos analíticos permitem chegar à composição volumétrica das misturas betuminosas de forma puramente analítica, não sendo para o efeito necessários quaisquer provetes. Além da obtenção da proporção de cada um dos agregados seleccionados, do ligante e de vazios na mistura, regra geral, estes métodos incluem modelos de previsão do desempenho mecânico das misturas. Como exemplo pode indicar-se a primeira parte do método desenvolvido pelo CRR - *Centre de Recherches Routières* da Bélgica (CRR, 1997). Estes métodos não garantem totalmente o bom desempenho das misturas, pelo que, regra geral, são realizados ensaios de caracterização mecânica ou outros que permitem efectivamente concluir sobre a qualidade das misturas e, assim, validar a fórmula para execução obtida de forma matemática. É o caso da Bélgica, onde a mistura formulada analiticamente, deverá respeitar um conjunto de exigências dependentes da realização de alguns ensaios mecânicos, nomeadamente dos ensaios de compressão *Marshall*, com simulador de tráfego e cantábrico.

Os métodos volumétricos permitem determinar a composição da mistura mais adequada e respectiva proporção volumétrica de agregados, betume e vazios, através dum ensaio que simula de forma bastante fiável o processo de compactação em obra. Normalmente é usada a prensa de corte giratória (PCG), cujo esquema de funcionamento é indicado na Figura 3.13. Na mesma figura apresenta-se a PCG do laboratório de mecânica de pavimentos do DEC-FCTUC, que por ter sido instalada recentemente não foi possível usar nos estudos de formulação realizados no âmbito desta investigação.



Figura 3.13 – Esquema de funcionamento da prensa de corte giratória (Picado-Santos, 2005, adaptado de LCPC, 2003) e aspecto do equipamento instalado no DEC-FCTUC

Apesar dos ensaios volumétricos não permitirem avaliar as características mecânicas das misturas compactadas, considera-se que as amostras produzidas em laboratório são representativas das que se esperam obter no pavimento e que a composição volumétrica seleccionada influencia o desempenho mecânico das misturas. Os métodos volumétricos, embora sejam mais confiáveis que os empíricos, também não garantem, por si só, um adequado desempenho das misturas. Por essa razão, quando se justifique, nomeadamente em situações mais gravosas (tráfego pesado intenso e/ou temperaturas muito elevadas), devem realizar-se ensaios de desempenho para verificação das características mecânicas das composições estudadas.

Podem apontar-se como exemplos de métodos volumétricos o nível I do *Superpave Mix Design System* (FHWA, 2001; Harman *et al.*, 2002), desenvolvido no âmbito do programa de investigação americano *Strategic Highway Research Program* (SHRP), e o nível I do *Australian National Asphalt Research Committee Mix Design Method* (Francken, 1998), que, de resto, são os mais usados na formulação de misturas betuminosas a quente nos EUA e na Austrália, respectivamente.

Nos últimos anos, a investigação no domínio da formulação de misturas tem sido direccionada para o desenvolvimento de novos métodos que incorporam critérios baseados no conhecimento das características mecânicas das misturas betuminosas, nomeadamente o módulo de deformabilidade, a resistência à fadiga e à deformação permanente. Por se alicerçarem nas propriedades “fundamentais” dos materiais, estes métodos designam-se de racionais ou fundamentais. Nestes métodos, as misturas betuminosas compactadas em

laboratório, seguindo determinadas relações em massa ou volumétricas (usando por exemplo a PCG), são sujeitas a uma adequada caracterização mecânica, realizando ensaios de desempenho que permitem avaliar o módulo de deformabilidade, a resistência à fadiga e à deformação permanente.

Os níveis II dos já referidos *Superpave Mix Design System* (FHWA, 2001; Francken, 1998; Harrigan e Youtcheff, 1994) e o *Australian National Asphalt Research Committee Mix Design Method* (Francken, 1998) são exemplos de métodos racionais. Embora colmatem as deficiências apontadas aos métodos volumétricos em termos de verificação do comportamento mecânico das misturas, não se pode esquecer que a realização dos ensaios de desempenho exige tempo e custos que só se justificam em pavimentos sujeitos a tráfego pesado significativo. Outros métodos racionais incorporam ainda modelos de previsão do comportamento mecânico das misturas em serviço, calibrados a partir dos resultados obtidos nos ensaios. Como exemplo, pode indicar-se o nível III do *Superpave*, cujo organograma com os três níveis referidos se esquematiza na Figura 3.14.

Todavia, os cadernos de encargos das administrações rodoviárias nacionais, nomeadamente o CEEP (JAE, 1998), regra geral, consideram o método de *Marshall* na formulação de misturas betuminosas a quente. Embora se trate dum método de base empírica, com as limitações já referidas, o mesmo pode ser usado no processo de formulação de misturas betuminosas recicladas a quente.

O método de *Marshall* resume-se aos seguintes passos: i) selecção dos agregados e do betume asfáltico, de modo a respeitar as especificações; ii) estudo da composição granulométrica; compactação dos provetes *Marshall*, considerando, no mínimo, cinco percentagens de betume, com intervalos de 0,5%, e três provetes por cada uma das percentagens; iii) obtenção das características volumétricas dos provetes e realização do ensaio de compressão *Marshall*; iv) determinação da percentagem de betume a usar. A percentagem de betume adoptada corresponde à média de três percentagens de betume (referentes à força de rotura máxima, à baridade mais elevada e ao valor médio dos limites de porosidade especificados). A percentagem de betume assim determinada, deverá conduzir a características volumétricas da mistura e parâmetros *Marshall* (estabilidade e deformação) que respeitem o especificado para a mistura em estudo.

A generalidade dos cadernos de encargos prevê que, depois de transpor a fórmula de trabalho para a central de fabrico, se faça a transposição para trecho experimental, de modo a validar a mistura e a definir os adequados procedimentos de execução em obra. Ressalve-se que o método não é adequado para formular misturas cuja dimensão máxima do agregado ultrapasse os 25,4 mm (caso de macadame betuminoso 0/37,5 mm) ou misturas com granulometria descontínua ou muito porosa.

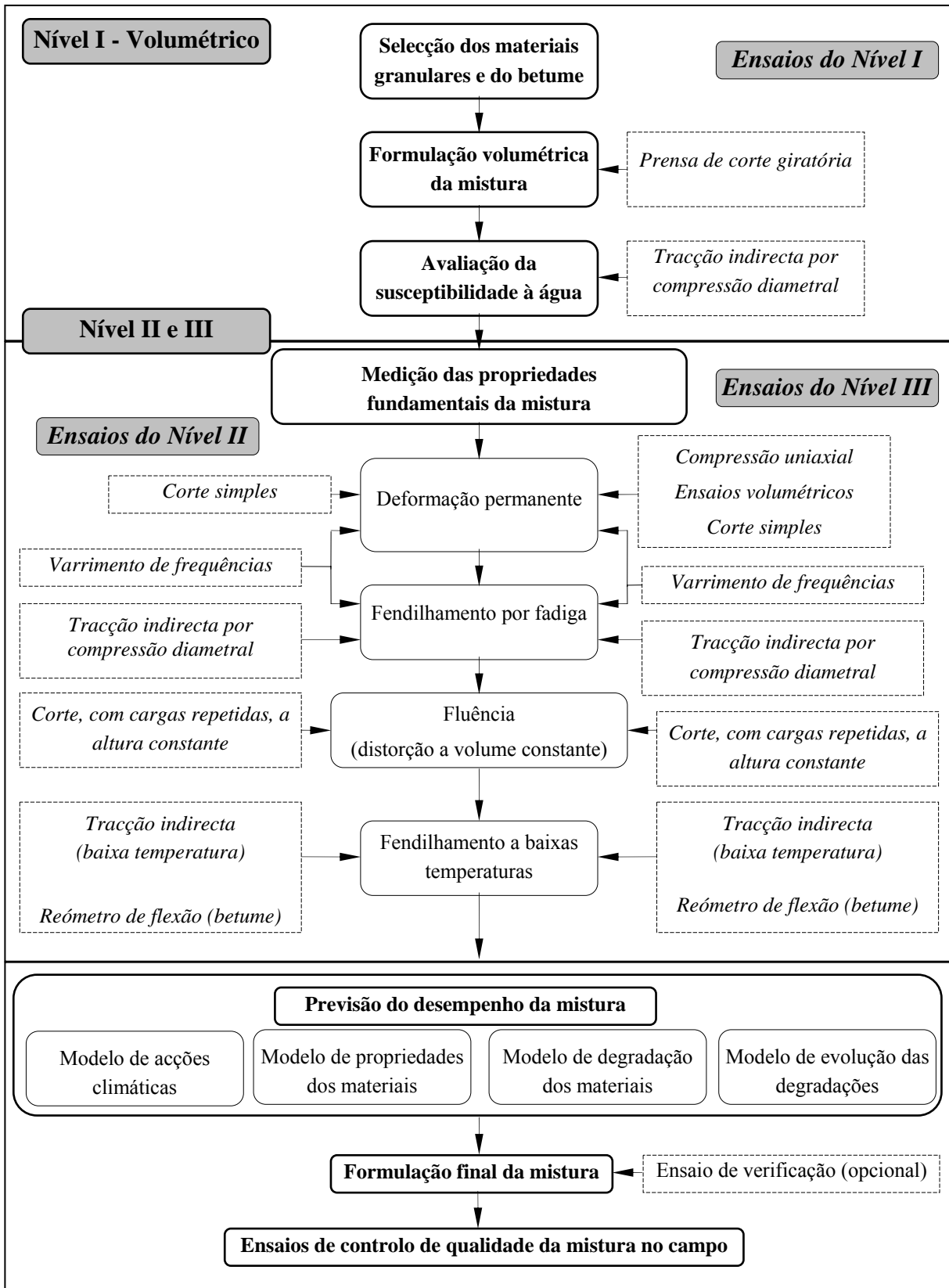


Figura 3.14 – Organograma do método americano *Superpave Mix Design System* para formulação de misturas betuminosas (Capitão, 2003, adaptado de Francken, 1998)

3.6.3 Método de formulação adaptável às condições tecnológicas portuguesas

O método que se apresenta foi proposto por Picado-Santos (2005) e constitui uma metodologia que leva em conta as actuais condições tecnológicas portuguesas. De acordo com o autor, a aplicação do método em Portugal permitirá melhorar de forma significativa a qualidade final das misturas e o seu desempenho quando em serviço, recorrendo a moderada mas praticável inovação tecnológica. A aplicação do método resume-se às três etapas apresentadas no organograma da Figura 3.15.

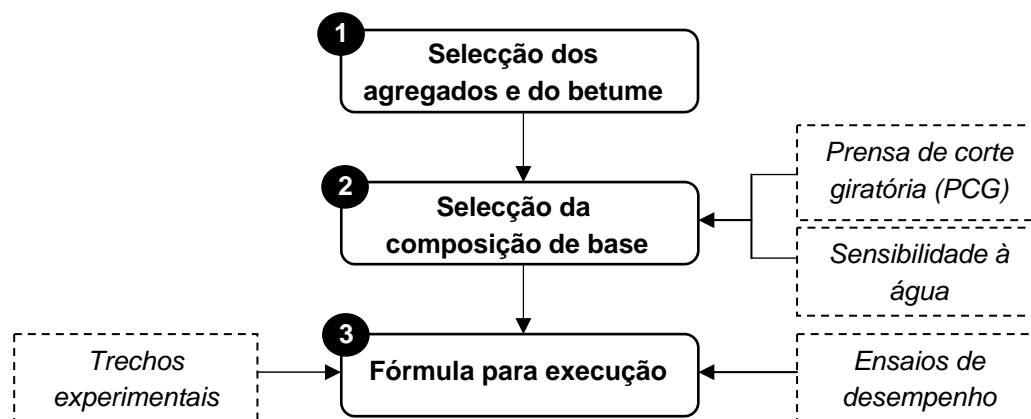


Figura 3.15 – Organograma do método de formulação adaptável às condições tecnológicas portuguesas (adaptado de Picado-Santos, 2005)

Na primeira etapa do método, faz-se a caracterização dos materiais elementares seguindo para o efeito procedimentos idênticos ao do método de *Marshall*, e seleccionam-se os agregados e o betume asfáltico a usar no estudo de formulação de acordo com o especificado no respectivo caderno de encargos.

Aos agregados é normalmente exigido que as propriedades físicas respeitem determinados limites em termos de granulometria, limpeza, resistência ao desgaste, adesividade ao betume e forma das partículas, entre outras. No que respeita ao betume, considera-se que as suas propriedades se encontram asseguradas no processo de produção, pelo que se recomenda apenas a verificação de algumas propriedades mais simples, como por exemplo a penetração a 25°C, segundo a EN 1426 (CEN, 1999-b), e a temperatura de amolecimento pelo método do anel e bola de acordo com a EN 1427 (CEN, 1999-c).

Na segunda etapa começa-se pelo estudo da composição granulométrica da mistura de agregados, tomando como referência o fuso granulométrico especificado para o tipo de mistura em estudo. O autor propõe a selecção de duas curvas granulométricas: uma mais “fina”, próxima do limite superior do fuso, e outra mais “grossa”, próxima do limite inferior do fuso, mas ambas não obrigatoriamente dentro do fuso. Para cada uma das composições, determina-se a percentagem de betume recorrendo a expressões analíticas, como por exemplo

ao método belga (CRR, 1997) ou à expressão empírica com base na superfície específica, usada em França, habitualmente usada em Portugal para misturas a frio (Branco *et al.*, 2005), traduzida pela seguinte expressão:

$$pb = K \times F \times \sqrt[5]{Se} \quad (3.56)$$

em que,

pb – percentagem de betume;

K – módulo de riqueza em betume, sendo K = 3,4 para misturas 0/10 mm; K = 3,0 para misturas 0/19 mm; K = 2,5 para misturas 0/37,5 mm;

F – constante igual a $2,65/p_a$, sendo p_a a massa volúmica da mistura de agregados;

Se – superfície específica, estimada pela seguinte expressão:

$$Se = 0,25 S_1 + 2,3 S_2 + 12 S_3 + 135 p_{200} \quad (3.57)$$

onde,

S_1 – proporção ponderal de elementos de dimensão superior a 6,3 mm;

S_2 – proporção ponderal de elementos de dimensão compreendida entre 0,315 e 6,3 mm;

S_3 – proporção ponderal de elementos de dimensão compreendida entre 0,075 mm e 0,315 mm;

p_{200} – proporção ponderal de elementos de dimensão inferior a 0,075 mm.

Obtidas as duas composições, analisa-se a evolução das características volumétricas das misturas (porosidade, VMA e grau de saturação em betume), recorrendo à prensa de corte giratória e tomando como referência as indicações do nível I do *Superpave Mix Design System* (FHWA, 2001 e Harman *et al.*, 2002). Para o efeito são indicados três níveis de compactação, representados pelos correspondentes números de rotações: $N_{r_{ini}}$, que representa as misturas durante a compactação; $N_{r_{dim}}$, representativo das misturas após compactação e durante a fase inicial da passagem do tráfego; $N_{r_{max}}$, correspondente a 2% de vazios e em que as misturas podem apresentar problemas de rodeiras.

No Quadro 3.11 indicam-se os números de rotações adoptados em função do número acumulado de eixos padrão de 80 kN considerado em dimensionamento (N_{80}). Na Figura 3.16 representam-se os parâmetros habitualmente considerados aquando da compactação na PCG.

Quadro 3.11 – Número de rotações para os três níveis de compactação

N_{80} (10^6)	$N_{r_{ini}}$	$N_{r_{dim}}$	$N_{r_{max}}$
< 0,3	6	50	75
0,3 a 3,0	7	75	115
3,0 a 30	8	100	160
> 30	9	125	205

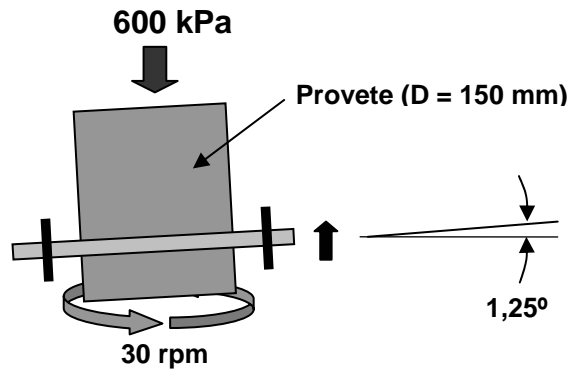


Figura 3.16 – Parâmetros usados na prensa de corte giratória

Antes da compactação das misturas na PCG até Nr_{max} , procede-se ao seu envelhecimento, mantendo a mistura a $135^{\circ}C$, durante quatro horas numa estufa com ventilação forçada. Desta forma procura-se simular o envelhecimento que ocorre durante o processo de compactação e colocação em obra. Após a compactação na PCG, determina-se a baridade da mistura no fim da compactação, Bm , e a baridade máxima teórica, Bt , recorrendo preferencialmente ao método do picnómetro de vácuo. A baridade da mistura, correspondente a Nr_{dim} , é dada por:

$$Bm_{dim} = Bm \times \frac{hm}{h_{dim}} \quad (3.58)$$

onde hm representa a altura do provete no final da compactação, o valor mais baixo, e h_{dim} a altura correspondente a Nr_{dim} . Ao fim de determinado número de rotações, Nr_i , o provete apresenta uma altura h_i , que permite determinar o respectivo grau de compactação usando a expressão seguinte.

$$GC_i = \frac{Bm}{Bt} \times \frac{hm}{h_i} \quad (3.59)$$

Traçadas as curvas de evolução da compactação, representando em abcissas o número de rotações, em escala logarítmica, e em ordenadas o grau de compactação, GC , calculam-se as correspondentes características volumétricas das misturas, todas expressas em %, correspondentes a Nr_{dim} .

$$n_{dim} = \frac{Bt - Bm_{dim}}{Bt} \quad (3.60)$$

$$GC_{dim} = 1 - n_{dim} \quad (3.61)$$

$$TVB_{dim} = \frac{Bm_{dim} \times pb}{\rho b} \quad (3.62)$$

$$VMA_{dim} = TVB_{dim} + n_{dim} \quad (3.63)$$

Se a porosidade obtida for igual ao valor especificado, 4%, a percentagem de betume inicial será tomada como referência e as características volumétricas obtidas correspondem ao pretendido. Contudo, regra geral, tal não sucede, pelo que é necessário ajustar a percentagem de betume e as restantes características volumétricas de cada uma das misturas, correspondentes à porosidade de 4% (ou GC de 96%). Para o efeito usam-se as expressões seguintes e apresenta-se o resultado em %.

$$pb_{est} = pb - 0,4 \times (0,04 - n_{dim}) \quad (3.64)$$

$$VMA_{est} = VMA_{dim} + C \times (0,04 - n_{dim}) \quad (3.65)$$

$$Sb_{est} = \frac{VMA_{est} - 0,04}{VMA_{est}} \quad (3.66)$$

No que respeita ao parâmetro C, admite-se $C = 0,1$ se $n_{dim} < 4\%$, e $C = 0,2$ se $n_{dim} > 4\%$. Determina-se ainda o grau de compactação correspondente a Nr_{ini} , usando a expressão seguinte:

$$GC_{ini} = \frac{h_{dim}}{h_{ini}} \times GC_{dim} - (0,04 - n_{dim}) \quad (3.67)$$

As características assim determinadas (GC_{ini} , VMA_{est} e Sb_{est}) e ainda a relação ponderal filer/betume, devem respeitar os limites indicados no Quadro 3.12. Recentemente, foram definidos novos requisitos para as características volumétricas das misturas (Christensen e Bonaquist, 2006). Entre as duas composições estudadas, selecciona-se a mais adequada em função dos limites especificados. Nesta fase, procede-se à validação da composição de base considerando a variação da quantidade de betume. O autor recomenda o estudo de três misturas com as seguintes percentagens de betume: pb_{est} , $Pb_{est} - 0,5\%$ e $pb_{est} + 0,5\%$.

Quadro 3.12 – Limites especificados para as misturas compactadas na PCG

N_{80} (10^6)	GC - Grau de compactação exigido (% Bt)			VMA mínimo (%)					Sb (%)	Relação ponderal filer/betume
				máxima dimensão do agregado (mm)						
	Nr_{ini}	Nr_{dim}	Nr_{max}	37,5	25,0	19,0	12,5	9,5		
< 0,3	≤ 90,5	96	≤ 98	37,5	25,0	19,0	12,5	9,5	70-80	0,6-1,2 ou 0,8-1,6
0,3 a 3,0	≤ 90,5			11,0	12,0	13,0	14,0	15,0	65-78	
3,0 a 30	≤ 89,0			65-75						
> 30										

Repete-se o processo descrito para as três misturas e, em função dos resultados obtidos, selecciona-se a composição de base que melhor verificar os critérios especificados. Para terminar a validação da composição de base, convém avaliar a sensibilidade à presença de água da mistura, determinando por exemplo a resistência conservada de acordo com a norma militar americana MIL-STD-620A ou a EN 12697-12 (CEN, 2003-b).

Depois de validada a composição de base, faz-se a sua transposição para os trechos experimentais, usando também rês percentagens de betume (a percentagem de betume base e outras duas, uma 0,5% acima e outra 0,5% abaixo). Na execução dos trechos experimentais deve controlar-se a evolução das características volumétricas das misturas de modo a atingirem características idênticas às da composição de base. Para verificar as condições de fabrico e de colocação em obra, devem determinar-se as características de provetes extraídos do pavimento e de amostras de mistura recolhidas à saída da espalhadora.

Para concluir a última etapa do método de formulação, a decisão final sobre a fórmula de trabalho a usar (ou fórmula para execução), será tomada em função dos resultados dos ensaios de desempenho que permitam avaliar o comportamento mecânico das misturas aplicadas nos trechos experimentais, nomeadamente no que respeita ao módulo de deformabilidade, à resistência à fadiga e à deformação permanente.

3.7 Métodos de Formulação de Misturas Betuminosas Recicladadas a Quente

3.7.1 Nota introdutória

Uma mistura betuminosa reciclada a quente (MBRQ), como se viu, difere duma mistura a quente tradicional na medida em que, na sua composição, além dos agregados e do betume asfáltico, existe um terceiro componente, o material fresado, e, em alguns casos, um rejuvenescedor do betume.

Regra geral, os métodos usados na formulação das misturas a quente são adaptáveis ao estudo das MBRQ. Porém, a adequação desses métodos exige a introdução de procedimentos adicionais nas diversas fases do processo de formulação, que procuram reflectir a influência das propriedades do material fresado, e respectivos componentes, nas características finais da mistura reciclada. Nesta secção, depois de apresentar a metodologia geral de formulação das MBRQ, comum à generalidade dos métodos, descrevem-se os principais métodos de formulação existentes e apresenta-se o método de formulação adoptado no trabalho.

3.7.2 Metodologia geral de formulação

Os principais passos seguidos na formulação das MBRQ, indicados na Figura 3.17, são comuns à maioria dos métodos existentes. Primeiro, faz-se a caracterização do material fresado e dos agregados novos, sendo necessário verificar se os materiais (agregados novos e

agregado do material fresado), cumprem o especificado para a mistura de referência sem incorporação de material fresado.

Segue-se o estabelecimento da composição de base (para a taxa de reciclagem adoptada) e que engloba, sequencialmente, o estudo da composição granulométrica, a estimativa das percentagens de betume total (pb_R) e novo (pb_N), a identificação do tipo de betume e/ou rejuvenescedor e, por fim, a determinação da percentagem de betume a usar.

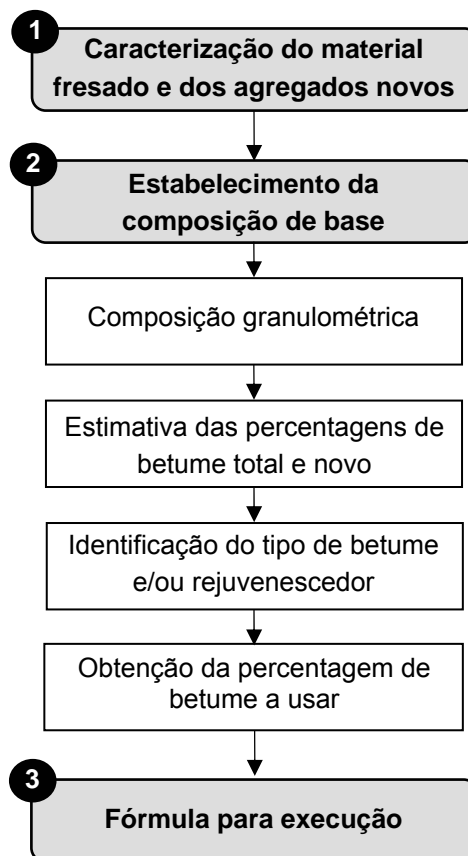


Figura 3.17 – Organograma da metodologia geral de formulação de misturas betuminosas recicladas a quente

Estabelecida a composição de base, os procedimentos usados para obter a fórmula para execução, são semelhantes aos usados nas misturas tradicionais, podendo ir desde a habitual transposição para trechos experimentais até à tomada de decisão em função das características mecânica das misturas obtidas em ensaios de desempenho.

Os métodos de formulação diferem, essencialmente, na caracterização do material fresado, no processo de selecção do tipo de betume e/ou rejuvenescedor e na metodologia usada para fixar a percentagem de betume da mistura reciclada.

Porém, as metodologias usadas na obtenção da percentagem de betume da composição de base, a transpor para os trechos experimentais, são basicamente as mesmas já mencionadas a respeito da formulação de misturas a quente, pelo que, a descrição dos principais métodos irá centrar-se, sobretudo, na caracterização do material fresado e na selecção do tipo de betume e/ou rejuvenescedor.

Na maioria dos métodos de formulação de MBRQ, a selecção do tipo de betume novo e/ou rejuvenescedor depende da taxa de reciclagem de betume, das características do betume existente no material fresado e das propriedades desejadas para o ligante final. Regra geral, depois de recuperar o betume existente no material fresado, determina-se a viscosidade ou as grandezas que constituem medidas indirectas da viscosidade: a penetração a 25°C e a temperatura de amolecimento.

A viscosidade do ligante final, pode estimar-se através do ábaco da ASTM D 4887 (ASTM, 1999-b) ou recorrendo a expressões simples. Tomando como referência a *Association Mondiale de la Route* (AIPCR, 2003), entre outras instituições, a penetração do ligante final a 25°C, pode ser estimada pela equação (3.68), a temperatura de amolecimento pelo método do anel e bola, pela equação (3.69) e a viscosidade pela equação (3.70).

$$\log(\text{pen}_R) = \text{TRb} \times \log(\text{pen}_F) + (1 - \text{TRb}) \times \log(\text{pen}_N) \quad (3.68)$$

$$\text{Tab}_R = \text{TRb} \times \text{Tab}_F + (1 - \text{TRb}) \times \text{Tab}_N \quad (3.69)$$

$$\log[\log(\text{Visc}_R)] = \text{TRb} \times \log[\log(\text{Visc}_F)] + (1 - \text{TRb}) \times \log[\log(\text{Visc}_N)] \quad (3.70)$$

onde,

pen_R - penetração do ligante final (10^{-1} mm);

TRb - taxa de reciclagem de betume;

pen_F - penetração do ligante envelhecido do material fresado (10^{-1} mm);

pen_N - penetração do betume de adição (10^{-1} mm);

Tab_R - temperatura de amolecimento do ligante final (°C);

Tab_F - temperatura de amolecimento do ligante envelhecido do material fresado (°C);

Tab_N - temperatura de amolecimento do betume novo (°C);

Visc_R - viscosidade do ligante final (Pa.s);

Visc_F - viscosidade do ligante envelhecido do material fresado (Pa.s);

Visc_N - viscosidade do betume de adição (Pa.s).

Qualquer uma das expressões anteriores pode ser representada graficamente. Por exemplo, a equação (3.68) pode ser representada como se mostra na Figura 3.18. No ábaco, verifica-se que, sendo a taxa de reciclagem de betume de 50%, a penetração do ligante recuperado de $20 \cdot 10^{-1}$ mm e pretendendo um ligante final com penetração de $40 \cdot 10^{-1}$ mm, chega-se a uma

penetração do betume novo de $80 \cdot 10^{-1}$ mm, o que só seria viável com um betume do tipo 70/100. Em alternativa, conhecidas a taxa de reciclagem de betume e a penetração do ligante envelhecido, escolhendo determinado tipo de betume e conhecida a respectiva penetração, pode estimar-se a penetração do ligante final. O mesmo pode ser feito a respeito da viscosidade ou da temperatura de amolecimento.

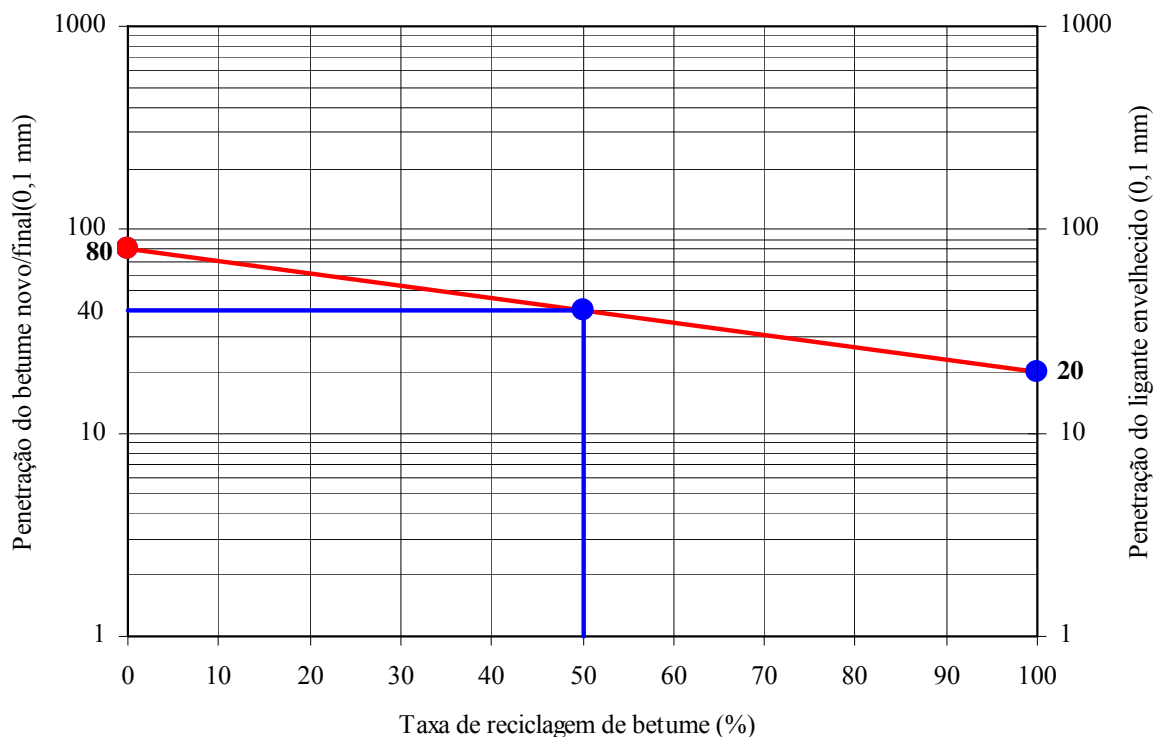


Figura 3.18 – Ábaco para estimar a penetração do ligante final de mistura reciclada a quente

A percentagem de betume novo influencia o comportamento de uma MBRQ. Verifica-se que, para a mesma TR, ao aumentar a quantidade de betume novo, porque diminui a TRb, diminui também a rigidez do ligante final. A título de exemplo, indicam-se no Quadro 3.13 estimativas da penetração do ligante final, aplicando a equação (3.68), em misturas recicladas com TR de 40%, material fresado com pb_F de 5,0% e penetração de $15 \cdot 10^{-1}$ mm, e betume novo tipo 70/100 (pen_N de $85 \cdot 10^{-1}$ mm) incorporado em percentagens de 2%, 3% e 4%.

Quadro 3.13 – Exemplos de estimativa da penetração do ligante final de mistura reciclada

pb _N (%)	pb _F (%)	pb _R (%)	TRb (%)	pen _R (10^{-1} mm)
2,0	5,0	4,0	50,0	36
3,0	5,0	5,0	40,0	42
4,0	5,0	6,0	33,3	48

Em termos de deformabilidade, o referido aumento da quantidade de betume novo deverá, em princípio, conduzir a uma diminuição do módulo de deformabilidade e a um pior comportamento à deformação permanente, duplamente agravado, não só pelo aumento da percentagem de betume, mas principalmente pela diminuição da rigidez da mistura. Por outro lado, em termos de fadiga, passar-se-á o inverso, porque a diminuição da rigidez e o aumento da percentagem de betume provocam, normalmente, um efeito duplo em termos de melhoria do comportamento à fadiga.

No que respeita ao tipo de betume de adição, para igual composição da mistura reciclada, optando por um betume mais brando, a rigidez da mistura final será menor, sendo espectável melhor comportamento à fadiga e pior desempenho à deformação permanente. Para percentagem de betume constante e igual betume de adição, a um aumento da TR corresponderá uma mistura mais rígida, e, por isso, provavelmente menos resistente à fadiga e com melhor comportamento à deformação permanente.

3.7.3 Métodos desenvolvidos nos EUA

Nos Estados Unidos da América (EUA) são duas as principais metodologias de formulação. O primeiro método, desenvolvido no *Asphalt Institute* (1986), assenta na estrutura geral já referida e a obtenção da percentagem óptima de betume é feita pelos referidos métodos de *Marshall* ou de *Hveem*. O segundo método constitui a adaptação do método *Superpave* ao estudo das MBRQ (Kandhal e Mallick, 1997).

- Método do *Asphalt Institute*

Neste método, o primeiro passo corresponde à caracterização do material fresado e dos agregados novos. Determina-se a granulometria do material fresado após extracção do betume, a percentagem de betume, pb_F , e a viscosidade a 60°C do betume recuperado. Se a taxa de reciclagem for baixa (da ordem dos 15% a 20%) não é necessário avaliar a viscosidade do betume recuperado (Kandhal e Mallick, 1997). Nesta situação, como o betume presente no material fresado tem pouca influência nas características do ligante final, o betume novo a adicionar é idêntico ao de uma mistura normal.

Depois de estudada a composição granulométrica, estima-se a percentagem de betume total da mistura reciclada, pb_R , usando a expressão empírica (3.71) que depende da granulometria seleccionada.

$$pb_R = 0,035 \times a + 0,045 \times b + K \times p_{200} + F \quad (3.71)$$

onde,

a - proporção ponderal de elementos de dimensão superior a 2,36 mm;

b - proporção ponderal de elementos de dimensão compreendida entre 0,075 mm e 2,36 mm;

p_{200} - proporção ponderal de elementos de dimensão inferior a 0,075 mm;

K - Constante dependente da percentagem de passados no peneiro n.º 200 (p_{200}):

K = 0,20 para p_{200} até 5%, K = 0,18 para p_{200} entre 6% e 10% e K = 0,15 para p_{200} entre 11% e 15%;

F - Constante não superior a 2% e que leva em conta a absorção do betume pelos agregados. Não existindo mais informação, sugere-se F = 0,7%.

Obtido o valor aproximado da percentagem de betume total, determina-se a percentagem de betume novo a adicionar, pb_N , usando a expressão (3.72) adaptada de Kandhal e Mallick (1997) usando a simbologia definida neste trabalho.

$$pb_N = \frac{(1 - Ra \times pb_F) \times pb_R}{1 - pb_F} - \frac{1 - Ra}{1 - pb_F} \times pb_F \quad (3.72)$$

onde, pb_R e pb_F têm o significado habitual e o parâmetro Ra, assumido como constante em cada caso, corresponde à relação entre a massa de agregado novo, ma_N , e a massa de agregado da mistura reciclada, ma_R :

$$Ra = \frac{ma_N}{ma_R} = \frac{ma_R - ma_F}{ma_R} = 1 - TRa \quad (3.73)$$

Tendo em conta as grandezas definidas na secção 3.2, se a taxa de reciclagem, TR, for constante, a expressão (3.72) corresponde simplesmente à equação (3.32).

Conhecida a proporção de ligante novo no ligante final da mistura reciclada, Rb, dada pelas equações (3.72) ou (3.32), e a viscosidade do ligante envelhecido, $Visc_F$, pode estimar-se a viscosidade exigida ao ligante novo usando o ábaco da Figura 3.19 proposto pelo *Asphalt Institute* (1986) que, de resto, traduz o previsto na norma ASTM D 4887 (ASTM, 1999).

$$Rb = \frac{pb_N}{pb_R} \quad (3.74)$$

$$Rb = \frac{mb_N}{mb_R} = \frac{mb_R - mb_F}{mb_R} = 1 - TR_b \quad (3.75)$$

O ábaco da Figura 3.19 corresponde à representação gráfica da equação (3.76), com a viscosidade dos ligantes (novo, envelhecido e final) em Pa.s, idêntica à equação (3.70), mas com os valores de viscosidade multiplicados por 100, de maneira a ser válida para valores baixos de viscosidade:

$$\log[\log(100Visc_R)] = TR_b \times \log[\log(100Visc_F)] + (1 - TR_b) \times \log[\log(100Visc_N)] \quad (3.76)$$

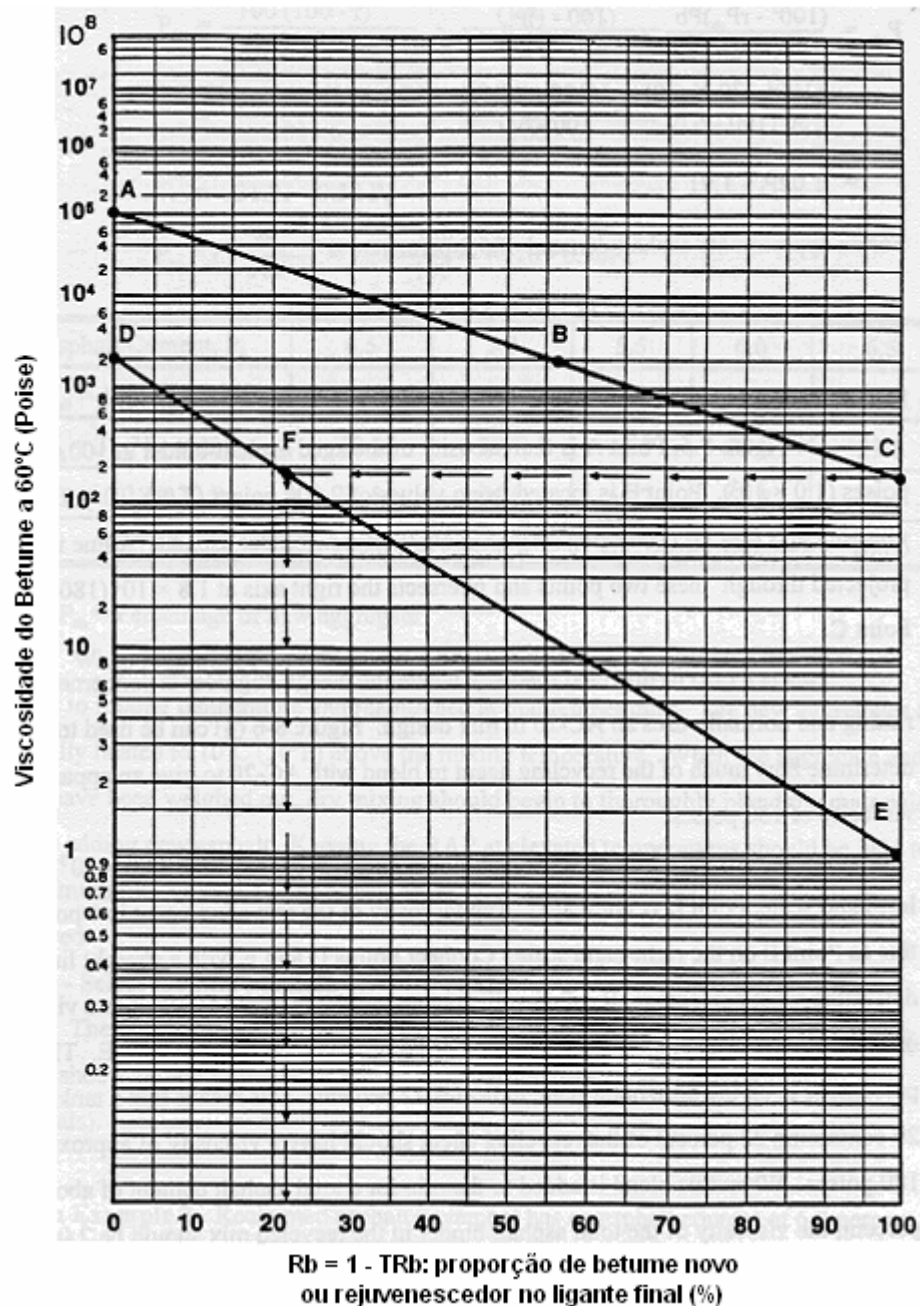


Figura 3.19 – Ábaco para determinar a viscosidade do betume novo (*Asphalt Institute*, 1986)

Para obter a viscosidade do betume novo ($Visc_N$), primeiro traça-se a recta que liga o ponto A, com viscosidade igual à do betume do material fresado ($Visc_F$), ao ponto B, com abcissa igual a R_b e a viscosidade pretendida para o ligante final ($Visc_R$). Prolongando a recta, obtém-se o ponto C do lado direito do ábaco e a viscosidade correspondente. No exemplo indicado na Figura 3.19, para $R_b = 57\%$, $Visc_F = 100000$ Poise, $Visc_R = 2000$ Poise (o valor indicado pelo *Asphalt Institute*), obtém-se uma viscosidade de 180 Poise para o betume novo. O ábaco pode igualmente ser usado para avaliar a proporção de rejuvenescedor a adicionar, o qual se assume

que apresenta a 60°C uma viscosidade de 1 Poise. Assim, não existindo betume asfáltico com a viscosidade determinada, $Visc_N$, obtém-se a proporção de rejuvenescedor no ligante novo, ligando o ponto D, relativo à viscosidade a 60°C do betume seleccionado, ao ponto E com ordenada igual a 1 Poise e abcissa indicativa da proporção de rejuvenescedor no betume novo. No exemplo do ábaco (Figura 3.19), optando por um betume com viscosidade a 60°C de 2000 Poise, chega-se ao ligante novo que tem de ter 22% dum agente rejuvenescedor.

O uso dum agente rejuvenescedor, nomeadamente em misturas com elevada incorporação de material fresado, além de melhorar as características do ligante envelhecido, conduz a misturas recicladas com maior durabilidade, favorece o envolvimento dos agregados novos pelo betume novo e permite que a mistura final cumpra mais facilmente as especificações. Nos EUA, segundo Kandhal e Mallick (1997), são essencialmente usados os rejuvenescedores classificados nas normas ASTM D 4552 (ASTM, 1992-c) e ASTM D 5505 (ASTM, 1997-d).

Por fim, após a selecção do betume e/ou rejuvenescedor, determina-se a percentagem óptima de betume pelo método de *Marshall* ou pelo método de *Hveem*. A fórmula para execução é escolhida de modo a obter uma porosidade de 4% na mistura final.

- Método Superpave

Nos EUA, as misturas betuminosas recicladas a quente têm sido também formuladas pela metodologia *Superpave* (McDaniel e Anderson, 2001; Kandhal e Mallick, 1997), antes referida a propósito da formulação de misturas betuminosas a quente. Comparativamente ao método anterior, além do uso da PCG no estudo da composição de base, existem diferenças no que respeita à caracterização do betume recuperado do material fresado e à forma de seleccionar o betume novo. Em função da taxa de reciclagem, TR, e da graduação PG do betume recuperado do material fresado, são recomendadas as opções de selecção do betume novo indicadas no Quadro 3.14.

Quadro 3.14 – Recomendações para selecção do betume novo (McDaniel e Anderson, 2001)

CASO	Recomendação para escolha do betume novo a usar	Classe do betume recuperado do material fresado		
		≤ PG Tx-22	PG Tx-16	PG Tx-10
A	Usar o betume normal	TR < 20%	TR < 15%	TR < 10%
B	Seleccionar betume da graduação PG abaixo	$20\% \leq TR \leq 30\%$	$15\% \leq TR \leq 25\%$	$10\% \leq TR \leq 15\%$
C	Seleccionar betume de acordo com gráficos de composição (<i>Blending Charts</i>)	TR > 30%	TR > 25%	TR > 15%

Na fase de caracterização dos materiais, além das características do material fresado referidas no método anterior, no CASO C será necessário recuperar ligante do material fresado para

avaliar as propriedades necessárias à caracterização *Superpave* segundo o esquema da Figura 3.20.

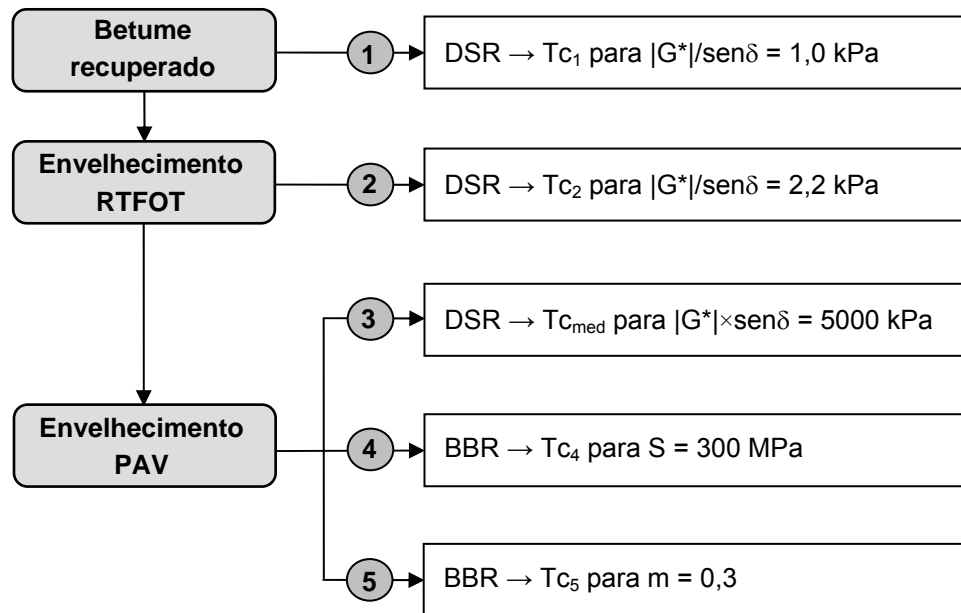


Figura 3.20 – Esquema seguido na caracterização de ligante recuperado do material fresado pela metodologia *Superpave* (adaptado de Bardesi *et al.*, 2002)

Recorrendo aos resultados do ensaio de corte dinâmico são avaliadas duas temperaturas altas: a temperatura crítica T_{c1} , para a qual o betume recuperado apresente $|G^*|/\text{sen}\delta$ igual a 1,0 kPa e a temperatura crítica T_{c2} , a que o betume sujeito a endurecimento pelo método RTFOT apresente o parâmetro $|G^*|/\text{sen}\delta$ igual a 2,2 kPa. A menor das duas temperaturas é a designada temperatura crítica alta, $T_{c\text{alta}}$.

De seguida é determinada a temperatura crítica média, $T_{c\text{med}}$, obtida também com base nos resultados do ensaio DSR e para a qual o betume endurecido pelos métodos RTFOT e PAV apresenta $|G^*| \times \text{sen}\delta$ igual a 5000 kPa.

Finalmente, são avaliadas duas temperaturas críticas do betume depois de endurecido por RTFOT e PAV, com base nos resultados do ensaio BBR. A primeira temperatura crítica baixa, T_{c4} , corresponde a um módulo de fluência, S , de 300 MPa, e a última, T_{c5} , a uma taxa de variação, m , de 0,30. A temperatura mais alta é a designada temperatura crítica baixa, $T_{c\text{baixa}}$.

Obtidas as três temperaturas críticas (alta, média e baixa), existem duas metodologias: o método A, aplicável ao caso da TR ser conhecida e pretendendo seleccionar o tipo de betume novo, e o método B, a aplicar quando se conhece o tipo de betume novo e se pretende avaliar

os limites da TR. Em ambos os casos é conhecida a graduação PG pretendida para o ligante final.

No método A, determina-se, para cada uma das três temperaturas críticas, as correspondentes temperaturas críticas do ligante novo, em função da taxa de reciclagem e das respectivas temperaturas críticas pretendidas para o ligante final. Para cada caso, pode recorrer-se a uma representação gráfica (Figura 3.21) ou, simplesmente, usar a seguinte expressão genérica:

$$T_{cN} = \frac{T_{cR} - TR \times T_{cF}}{1 - TR} \quad (3.77)$$

onde,

T_{cN} - temperatura crítica do betume novo (alta, média ou baixa), em °C;

T_{cR} - temperatura crítica do ligante final (alta, média ou baixa), em °C;

T_{cF} - temperatura crítica do ligante do fresado (alta, média ou baixa), em °C;

TR - taxa de reciclagem.

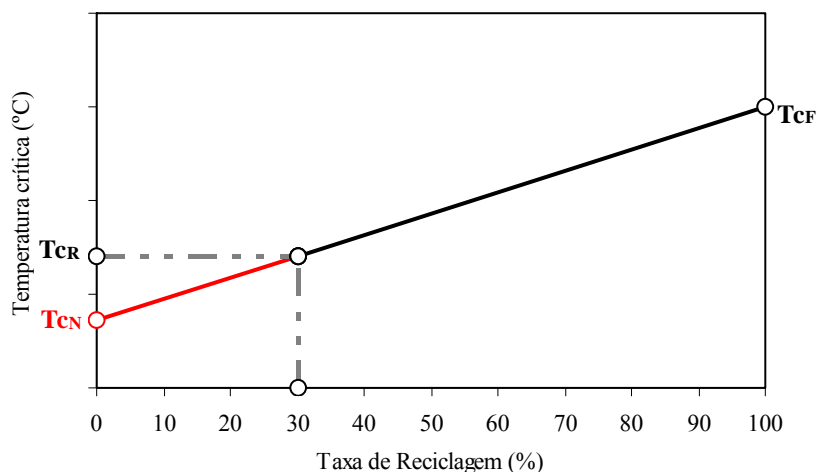


Figura 3.21 – Representação gráfica da obtenção das temperaturas críticas do betume novo (T_{cN}) em função da taxa de reciclagem e das temperaturas críticas do ligante do fresado (T_{cF}) e do ligante final (T_{cR})

Determinadas as temperaturas críticas do betume novo, selecciona-se um betume cuja graduação PG satisfaça os resultados. No método B, determina-se para cada um dos conjuntos de temperaturas críticas (altas, médias e baixas) dos ligantes, a taxa de reciclagem correspondente. Para isso, recorre-se, em cada caso, a uma representação gráfica idêntica à da Figura 3.22, ou à expressão (3.78), onde as variáveis tem o significado referido. A taxa de reciclagem máxima será o menor dos valores encontrados para as três temperaturas críticas.

$$TR = \frac{T_{cR} - T_{cN}}{T_{cF} - T_{cN}} \quad (3.78)$$

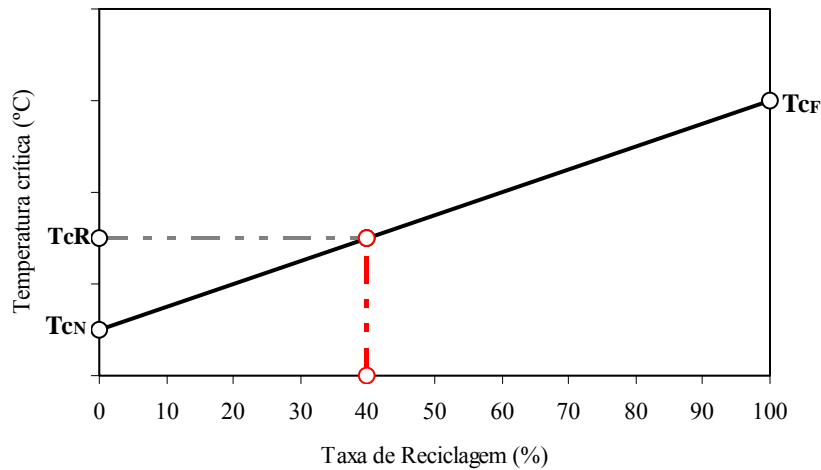


Figura 3.22 – Representação gráfica da obtenção da TR em função das temperaturas críticas do betume novo (T_{cN}), do ligante do fresado (T_{cF}) e do ligante final (T_{cR})

Ressalve-se que, em ambos os métodos, as temperaturas críticas a considerar para o betume final devem respeitar o previsto na classificação segundo a graduação PG prevista na ASTM D 6373 (ASTM, 1999-a).

$$T_{c_{alta}} = T_x \quad (3.79)$$

$$T_{c_{med}} = \frac{T_x + T_y}{2} + 4 \quad (3.80)$$

$$T_{c_{baixa}} = T_y + 10 \quad (3.81)$$

Como se viu antes (Quadro 3.13), a taxa de reciclagem (TR), considerada nesta metodologia de selecção do betume, pode diferir da taxa de reciclagem de betume (TRb). Por esta razão, entende-se que deve existir algum cuidado na aplicação do procedimento nos casos em que a TR é muito diferente de TRb.

As fases seguintes são idênticas às usadas na formulação de misturas a quente tradicionais, com a formulação volumétrica realizada pela PCG e aplicando os restantes procedimentos do método *Superpave* (McDaniel e Anderson, 2001; Kandhal e Mallick, 1997; Harrigan, 2001).

3.7.4 Método Australiano

A metodologia usada na Austrália na formulação de misturas betuminosas recicladas a quente é idêntica à metodologia geral descrita na secção 3.7.2 (Figura 3.17). Após a caracterização do material fresado (percentagem de betume, características do betume e granulometria do agregado), procede-se à composição granulométrica, estimativa da percentagem de betume novo e/ou rejuvenescedor e, por fim, à obtenção da composição final seguindo a metodologia de formulação australiana (Austroads, 2006-a). Ressalve-se que, neste país, a técnica de reciclagem a quente é principalmente feita *in situ*.

A selecção do betume novo e/ou rejuvenescedor é feita de modo a obter um ligante final com penetração mínima de $35 \cdot 10^{-1}$ mm, viscosidade a 60°C de 350 Pa.s a 900 Pa.s e temperatura de amolecimento entre 52°C e 56°C (Austroads, 2006-b; Ibarra, 2003). A viscosidade do ligante final, $Visc_R$, deverá ser tal que $\log(Visc_R)$ cumpra os limites de 4,5, para tráfego pesado, e 4,2 para tráfego ligeiro. Para taxas de reciclagem acima de 20%, será obrigatoriamente usada uma quantidade de rejuvenescedor ou betume novo, que verifique a expressão seguinte:

$$R_b = \frac{\log[\log(Visc_F) + 3] - \log[\log(Visc_R) + 3]}{\log[\log(Visc_F) + 3] - \log[\log(Visc_N) + 3]} \quad (3.82)$$

$Visc_R$ - viscosidade do ligante final (Pa.s);

$Visc_N$ - viscosidade do rejuvenescedor ou betume novo (Pa.s);

$Visc_F$ - viscosidade do betume do material fresado (Pa.s);

R_b - proporção de ligante novo no ligante final da mistura reciclada.

A expressão é assumida como válida para viscosidade dos ligantes estabelecida para igual temperatura (entre 40°C e 100°C), sendo habituais as viscosidades a 45°C ou 60°C. No Quadro 3.15 indicam-se os limites de penetração e logaritmos das viscosidades para as três classes de betume consideradas na Austrália.

Quadro 3.15 – Características dos betumes e viscosidades consideradas na Austrália (Austroads, 2000)

Classe de betume	Penetração (10^{-1} mm)	Limites da viscosidade do betume novo (log Pa.s)		Viscosidade do ligante final, após mistura (log Pa.s)	
		45°C	60°C	45°C	60°C
170	45 - 60	3,6 - 4,1	2,3 - 2,7	3,8	2,5
320	35 - 50	4,0 - 4,5	2,6 - 3,0	4,2	2,8
600	20 - 40	4,4 - 4,8	2,9 - 3,3	4,6	3,1

Considere-se o seguinte exemplo: betume do material fresado com $Visc_F$ a 60°C igual a 10000 Pa.s e ligante final da classe 170 ($Visc_R$ a 60°C de $10^{2,5} = 320$ Pa.s). Recorrendo a um

ligante novo da classe 320, adoptando para $Visc_N$ o valor correspondente à média dos limites ($10^{2,8} = 630$ Pa.s), obtém-se R_b igual a 0,78, o que representa uma taxa de reciclagem de betume de 22%.

3.7.5 Método Espanhol

Em Espanha, para taxas de reciclagem até 10% a formulação de MBRQ é igual à das misturas tradicionais. A metodologia seguida para incorporações de material fresado entre 10% e 50% segue os habituais passos: caracterização dos materiais (material fresado e materiais novos), estabelecimento da composição de base e da fórmula para execução.

A selecção do betume novo ou rejuvenescedor pode ser feita de acordo com a expressão (3.83), obtida de (3.68), que relaciona a penetração dos ligantes (Marín, 2001), e onde as variáveis têm o significado habitual.

$$pen_N = 10^{\frac{\log(pen_R) - TR_b \times \log(pen_F)}{1 - TR_b}} \quad (3.83)$$

onde,

pen_N - penetração mínima do betume novo (10^{-1} mm);

pen_R - penetração pretendida para o ligante final (10^{-1} mm);

pen_F - penetração do ligante do material fresado (10^{-1} mm);

TR_b - taxa de reciclagem de betume, dada pela expressão (3.29).

Em alternativa, são propostos critérios de selecção do betume (Quadro 3.16) em função da TR, da penetração do ligante recuperado do material fresado, pen_F , e do tipo de betume final pretendido (Bardesi *et al.*, 2002).

Quadro 3.16 – Critérios de selecção do betume (Bardesi *et al.*, 2002)

Ligante final	Taxa de reciclagem (%)	Penetração do ligante do fresado (10^{-1} mm)		
		< 15	15 - 30	30 - 50
B 13/22	< 15	[1]	[1]	[2]
	15 - 30	[1]	[2]	[2]
	> 30	[2] ³	[2]	[2]
B 40/50	< 15	[1]	[1]	[1]
	15 - 30	[2]	[2]	[1]
	> 30	[3]	[2]	[1]
B 60/70	< 15	[2]	[1]	[1]
	15 - 30	[3]	[2]	[1]
	> 30	[3]	[3]	[2]

³ Solução [3] se penetração for inferior a $10 \cdot 10^{-1}$ mm.

As três soluções indicadas significam o seguinte. Na solução [1] será usado betume novo igual ao pretendido. Na solução [2] será determinado o ligante de acordo com a metodologia expressa pela equação (3.83). Nos casos assinalados com a solução [3] deverá seleccionar-se o betume novo seguindo procedimentos que levem em conta a consistência dos ligantes e, eventualmente, o uso de rejuvenescedor.

Depois de seleccionar o betume novo e/ou rejuvenescedor, estabelece-se a composição final pelo método de *Marshall*, ensaio de imersão-compressão e ensaio com simulador de tráfego em laboratório. A mistura reciclada a quente deverá respeitar o especificado pelo Ministério de Fomento (2001).

Como valor indicativo para a percentagem de betume final da mistura reciclada, pb_R , pode usar-se o método proposto pela Repsol-YPF (Bardesi *et al.*, 2002) e que tem a particularidade de pb_R depender da relação filer/betume, R_{fb} , e da percentagem de filer na mistura reciclada, aqui interpretada como a percentagem de material passado no peneiro n.º 200 (p_{200}).

$$pb_R = \frac{P_{200}}{R_{fb} + p_{200}} \quad (3.84)$$

Substituindo pb_R na expressão (3.32), obtém-se a expressão (3.85) para a percentagem total de betume novo e/ou rejuvenescedor.

$$pb_N = \frac{P_{200}}{R_{fb} + p_{200}} - pb_F \times TR \quad (3.85)$$

No método Repsol-YPF é recomendado o uso de um ligante novo que resulta da mistura de um betume novo igual ao pretendido na mistura final e de um rejuvenescedor. Este ligante final (betume e rejuvenescedor) deverá apresentar uma penetração calculada pela expressão (3.83).

3.7.6 Método de formulação adoptado

Nos trabalhos experimentais adoptou-se uma metodologia de formulação das MBRQ, com uma estrutura idêntica à metodologia geral descrita, adaptada às condições laboratoriais disponíveis e às particularidades da composição das MBRQ. Na Figura 3.23 apresenta-se o organograma da metodologia adoptada, aplicável à formulação de misturas com taxa de reciclagem (TR) definida à partida.

Na primeira fase caracterizam-se os agregados novos e o material fresado, avaliando a percentagem de betume do fresado, pb_F , pelo método de incineração, e a granulometria do agregado do material fresado. Caracteriza-se também o betume recuperado em evaporador

rotativo, determinando a penetração, pen_F , e a temperatura de amolecimento pelo método do anel e bola.

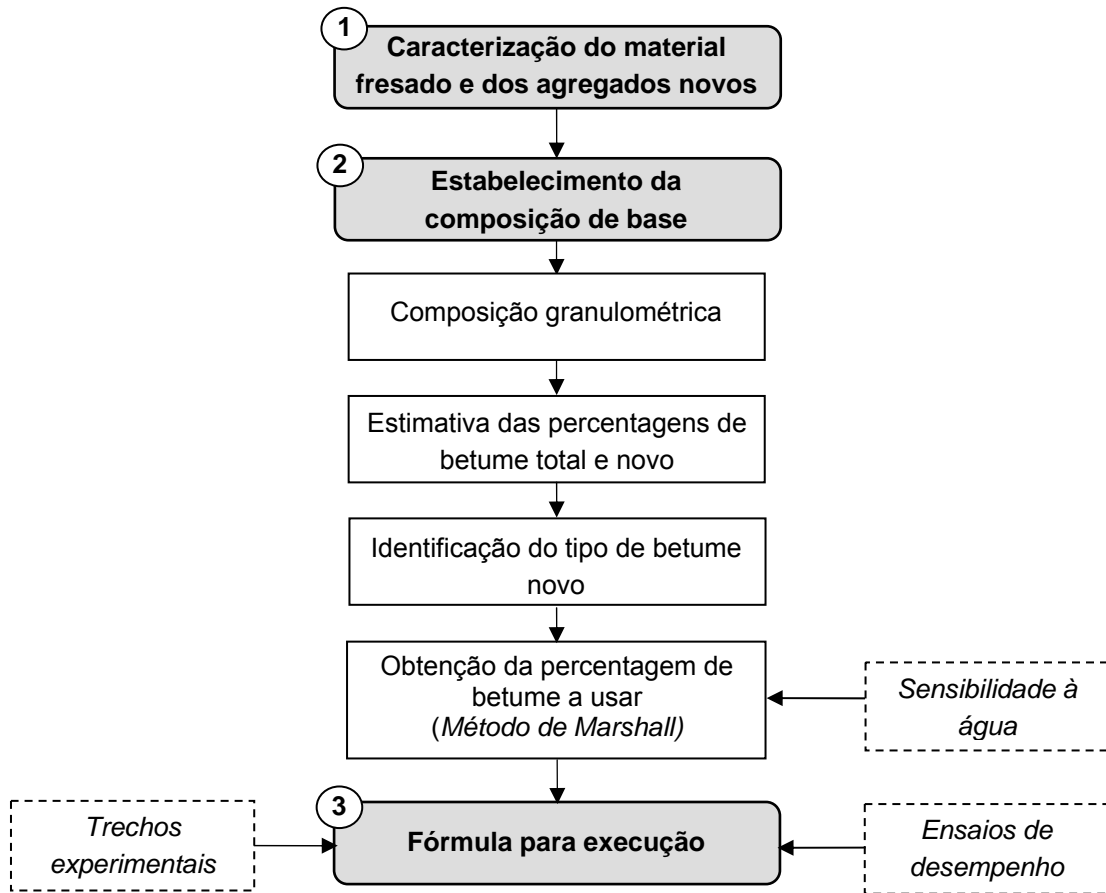


Figura 3.23 – Organograma da metodologia adoptada para formulação de misturas betuminosas recicladas a quente

De seguida, faz-se o estudo de composição granulométrica da forma habitual, encarando o agregado do material fresado como mais um agregado presente na mistura reciclada de modo a encaixar a mistura no fuso granulométrico previsto no CEEP para a mistura a quente correspondente.

A percentagem de betume total da mistura reciclada, pb_R , pode estimar-se pela fórmula (3.56) que, recorde-se, depende da superfície específica da mistura de agregados. A percentagem de betume novo calcula-se pela expressão (3.32) e a identificação do betume a usar faz-se recorrendo à relação logarítmica entre a penetração dos ligantes. Assim, o betume novo deverá apresentar uma penetração de valor igual ou superior ao valor obtido pela expressão (3.83).

Seleccionado o betume novo, obtém-se a percentagem de betume a usar pelo método de *Marshall*. A composição final considera-se estabelecida após a avaliação da sensibilidade à água, realizando o ensaio de resistência conservada. Por fim, tal como na metodologia proposta por Picado-Santos (2005), depois de validada a composição de base, faz-se a sua transposição para os trechos experimentais e a decisão final sobre a fórmula para execução a usar (ou fórmula de trabalho), será tomada em função dos resultados dos ensaios de desempenho que permitam avaliar o comportamento mecânico das misturas aplicadas nos trechos experimentais, nomeadamente no que respeita ao módulo de deformabilidade, à resistência à fadiga e à deformação permanente.

3.7.7 Exemplo de formulação

Nesta secção apresenta-se, de forma resumida, exemplo de aplicação da metodologia anterior ao estudo da composição de uma MBRQ até ao estabelecimento da composição de base, considerando incorporações de material fresado de 30%, 40% e 50%, e tomando como referência os resultados apresentados por Picado-Santos (2003). A mistura a estudar é um macadame betuminoso (Fuso A) a usar em camada de base ou regularização com espessura não superior a 10 cm. As misturas seriam para dar continuidade aos trabalhos experimentais. Contudo, como se verá no capítulo seguinte, houve necessidade de reformular as misturas.

- Caracterização do material fresado

Determinou-se a percentagem de betume do material fresado pelo método de incineração (ASTM D 6307:1998). Os resultados obtidos para as três amostras ensaiadas apresentam-se de forma resumida no Quadro 3.17. Como é tecnicamente recomendável, o factor de correcção foi determinado a partir da incineração de duas amostras de agregado, com massa idêntica à das amostras de material fresado e provenientes da mesma pedreira. Perante a percentagem de betume obtida ($pb_F = 5,1\%$) pode concluir-se sobre a homogeneidade do material fresado neste aspecto.

Quadro 3.17 – Percentagem de betume do material fresado usado nos trechos experimentais

Amostra	Massa total (g)	Massa de agregado (g)	Factor de correcção	Massa de betume corrigida (g)	Percentagem de betume (%)
M-01	3173,0	2993,0	1,0067	160,0	5,0
M-02	3406,0	3210,0	1,0067	174,6	5,1
M-03	3318,0	3126,0	1,0067	171,1	5,2

Após a extracção do betume existente no material fresado, prepararam-se dois provetes da mistura de agregados para avaliação da granulometria. No Quadro 3.18 apresentam-se os resultados da análise granulométrica.

De modo a caracterizar o ligante existente no material fresado fez-se a recuperação do betume em evaporador rotativo seguindo o procedimento de “Recuperação de betumes de misturas

betuminosas para caracterização dos mesmos”, à data seguido pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), de resto idêntico ao preconizado na EN 12697-3 (CEN, 2000-b).

Quadro 3.18 – Resultados da análise granulométrica do agregado do material fresado (Picado-Santos, 2003)

Peneiro ASTM	Abertura das malhas (mm)	Percentagem acumulada do material que passa (%)		
		AG-01	AG-02	Valor médio
1”	25,0	100,0	100,0	100,0
3/4”	19,0	100,0	100,0	100,0
1/2”	12,5	95,5	95,9	95,2
3/8”	9,5	87,5	87,5	87,5
n.º 4	4,75	65,3	67,3	66,3
n.º 10	2,00	45,2	47,7	46,4
n.º 20	0,850	32,8	34,6	33,7
n.º 40	0,425	23,5	24,7	24,1
n.º 80	0,180	15,1	15,7	15,4
n.º 200	0,075	8,2	7,7	8,0

Sobre o ligante recuperado determinou-se a penetração a 25°C segundo a EN 1426 (CEN, 1999-b) e o ponto de amolecimento pelo método do anel e bola pela EN 1427 (CEN, 1999-c). Como seria de esperar, os resultados obtidos (Quadro 3.19) revelam um betume duro de baixa penetração e temperatura de amolecimento elevada.

Quadro 3.19 – Características do betume recuperado do material fresado

Amostra	Penetração a 25°C, 100 g, 5 seg (10^{-1} mm)	Temperatura de anel e bola (°C)
B-01	14	73

- Granulometria dos agregados novos

Os agregados novos usados, de natureza calcária, resumem-se a duas britas (5/15 e 15/25), pó 0/5 e filer comercial. Após análise granulométrica obtiveram-se os resultados apresentados no Quadro 3.20 e onde se indica também o fuso granulométrico previsto no CEEP para macadame (Fuso A).

- Composição granulométrica

Para cada taxa de reciclagem, determinou-se numericamente a composição granulométrica da mistura (agregados novos e agregado do material fresado) de modo a verificar o fuso. No Quadro 3.21 apresentam-se os resultados a que se chegou. A título de exemplo mostra-se na Figura 3.24 o encaixe no fuso granulométrico da mistura com 40% de incorporação de material fresado.

Quadro 3.20 – Resultados da análise granulométrica dos agregados novos e fuso

Peneiro ASTM	Abertura das malhas (mm)	Percentagem acumulada do material que passa (%)				FUSO A
		15/25	5/15	0/5	Filer	
1"	25,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100
3/4"	19,0	92,8	100,0	100,0	100,0	95-100
1/2"	12,5	13,0	98,3	100,0	100,0	60-91
3/8"	9,5	1,3	70,5	100,0	100,0	51-71
n.º 4	4,75	0,2	5,3	99,8	100,0	36-51
n.º 10	2,00	0,2	1,6	61,3	100,0	26-41
n.º 20	0,850	0,2	1,3	31,9	100,0	17-32
n.º 40	0,425	0,2	1,0	16,0	99,0	11-25
n.º 80	0,180	0,2	0,6	4,3	96,1	5-17
n.º 200	0,075	0,2	0,5	1,0	78,3	2-8

Quadro 3.21 – Resultados da composição granulométrica

Agregado	Proporção dos agregados na mistura de agregados (%)		
	TR = 30%	TR = 40%	TR = 50%
Filer	5,5	3,0	2,5
Pó 0/5	18,0	14,0	8,5
Brita 5/15	18,0	15,0	11,5
Brita 15/25	28,5	28,0	27,5
Agregado do fresado	30,0	40,0	50,0

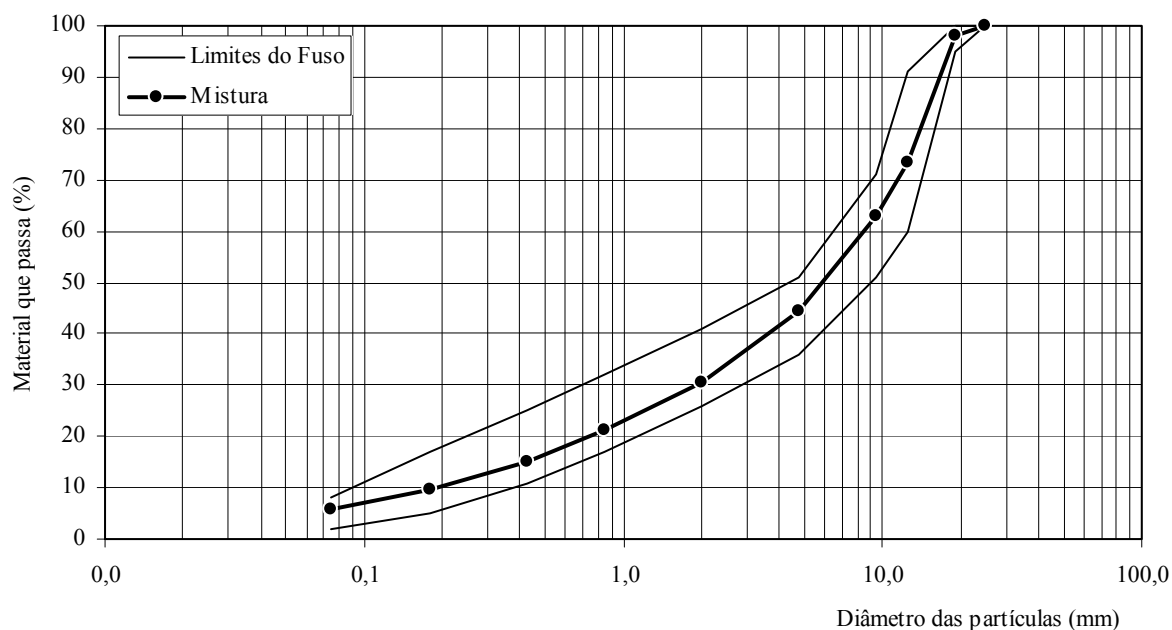


Figura 3.24 – Verificação do fuso granulométrico (TR = 40%)

- Estimativa da percentagem de betume

Estimou-se a percentagem de betume total, pb_R , através da fórmula empírica com base na superfície específica, a equação (3.56) referida na secção 3.6.3, e usando $K = 3,0$. No Quadro 3.22 apresenta-se um resumo dos resultados obtidos.

Quadro 3.22 – Resumo dos resultados da aplicação da fórmula da superfície específica

Parâmetro	TR = 30%	TR = 40%	TR = 50%
ρ_a (g/cm ³)	2,688	2,688	2,688
F	0,986	0,986	0,986
S ₁	48,1	48,1	47,7
S ₂	37,8	38,6	38,1
S ₃	7,1	7,5	8,0
p ₂₀₀	7,0	5,8	6,2
Se	11,3	9,7	10,3
pb_R (%)	4,8	4,7	4,7

Em face dos resultados, adoptou-se 5,0% para percentagem de betume total de referência para as três taxas de reciclagem. Tendo em conta a percentagem de betume do material fresado (5,1%), usando a expressão (3.32) obtém-se:

$$TR = 30\% \rightarrow pb_N = 5,0 - 5,1 \times 0,30 = 3,5\%$$

$$TR = 40\% \rightarrow pb_N = 5,0 - 5,1 \times 0,40 = 3,0\%$$

$$TR = 50\% \rightarrow pb_N = 5,0 - 5,1 \times 0,50 = 2,5\%$$

- Selecção do betume novo

Na escolha do ligante novo a adicionar, decidiu-se que deveria ser usado o mesmo betume nas três taxas de reciclagem e que a penetração do ligante final deveria ser no mínimo $30 \cdot 10^{-1}$ mm. Optando por um betume 50/70 e usando a expressão (3.68), obtiveram-se os resultados indicados no Quadro 3.23. Verifica-se que apenas para 50% de incorporação de material fresado a penetração do ligante final estará um pouco abaixo do limite. No entanto, entendeu-se por bem escolher o betume 50/70.

Quadro 3.23 – Resumo do cálculo da penetração do ligante final

TR (%)	pb_F (%)	pb_R (%)	TRb (%)	pen_F (10 ⁻¹ mm)	pen_N (10 ⁻¹ mm)	pen_R (10 ⁻¹ mm)
30	5,1	5,0	30,6	14	60	38
40	5,1	5,0	40,8	14	60	33
50	5,1	5,0	51,0	14	60	29

- Estabelecimento da percentagem de betume a usar

No estudo pelo método de *Marshall* considerou-se a percentagem de betume de referência, duas abaixo (4,0% e 4,5%) e duas acima (5,5% e 6,0%), resultando as percentagens de betume novo indicadas no Quadro 3.24.

Quadro 3.24 – Resumo da percentagem de betume novo usadas no método de *Marshall*

TR (%)	pb_R = 4,0%	pb_R = 4,5%	pb_R = 5,0%	pb_R = 5,5%	pb_R = 6,0%
30	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5
40	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
50	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5

Na preparação dos provetes em laboratório, o betume foi aquecido a 140°C e os agregados de correcção a 180°C. No que respeita à MBR, após algumas tentativas em laboratório, concluiu-se que a melhor forma de simular a produção em central, em que o seu aquecimento será feito por condução, seria aquecendo o material fresado a uma temperatura da ordem dos 135°C.

Seguindo o procedimento habitual, após a obtenção da baridade dos provetes, realizou-se o ensaio de compressão *Marshall*, determinando a força de rotura e a deformação. Determinou-se a baridade máxima teórica das misturas em laboratório recorrendo ao picnómetro de vácuo. Por fim, a análise dos resultados dos ensaios conduziu aos valores que se resumem nos quadros seguintes e que permitiram traçar as curvas representativas da variação das características das misturas com a percentagem de betume.

Quadro 3.25 – Resumo dos resultados do estudo *Marshall* (TR = 30%)

pb_R (%)	pb_N (%)	B_m (g/cm ³)	n (%)	TVB (%)	VMA (%)	S_b (%)	Frot (N)	Def. (mm)
4,0	2,5	2,414	3,6	9,4	13,0	72,3	12250	3,2
4,5	3,0	2,432	2,4	10,6	13,1	81,4	10200	3,4
5,0	3,5	2,434	2,0	11,8	13,8	85,4	8750	4,6
5,5	4,0	2,430	1,9	13,0	14,9	87,2	7675	5,1
6,0	4,5	2,427	1,9	14,1	16,1	88,1	7525	5,4

Quadro 3.26 – Resumo dos resultados do estudo *Marshall* (TR = 40%)

pb_R (%)	pb_N (%)	B_m (g/cm ³)	n (%)	TVB (%)	VMA (%)	S_b (%)	Frot (N)	Def. (mm)
4,0	2,0	2,332	7,2	9,1	16,3	55,8	11575	3,7
4,5	2,5	2,367	5,5	10,3	15,8	65,5	10825	4,0
5,0	3,0	2,389	4,4	11,6	16,0	72,6	9375	4,2
5,5	3,5	2,391	3,7	12,8	16,5	77,5	9175	4,2
6,0	4,0	2,388	3,0	13,9	16,9	82,4	7275	4,5

Quadro 3.27 – Resumo dos resultados do estudo *Marshall* (TR = 50%)

pb_R (%)	pb_N (%)	Bm (g/cm ³)	n (%)	TVB (%)	VMA (%)	Sb (%)	Frot (N)	Def. (mm)
4,0	1,5	2,289	8,7	8,9	17,6	50,6	11150	3,5
4,5	2,0	2,314	7,2	10,1	17,4	58,3	10600	3,6
5,0	2,5	2,336	6,1	11,3	17,4	65,0	10950	3,6
5,5	3,0	2,368	4,5	12,6	17,2	73,7	9950	3,9
6,0	3,5	2,364	4,1	13,8	17,8	77,2	8925	4,7

Verificou-se que, no caso da mistura com 30% de material fresado, os valores obtidos para a porosidade foram todos inferiores 4,0%, pelo que não se considerou a sua contribuição para a estimativa da percentagem óptima de betume. As curvas obtidas (não apresentadas) conduziram aos valores de percentagem de betume referentes à força de rotura máxima, baridade máxima e porosidade média (5,0%) e respectivo valor médio, indicados no Quadro 3.28. Refira-se que a porosidade corresponde à média dos limites definidos no CEEP para a mistura em estudo.

Quadro 3.28 – Resumo das percentagens de betume novo (%) e respectiva percentagem óptima, obtidas pelo método de *Marshall* para as quatro composições estudadas.

Percentagem de betume determinada	TR = 30%	TR = 40%	TR = 50%
Força de rotura máxima	2,5	2,0	1,5
Baridade máxima	3,3	3,3	3,1
Porosidade de 5,0%	-	2,7	2,8
Valor médio (percentagem óptima de betume novo)	2,9	2,7	2,5

Determinada a percentagem óptima de betume novo, obtiveram-se os correspondentes valores de força de rotura, porosidade, VMA e deformação, para verificação das condições definidas no CEEP relativas ao macadame betuminoso, fuso A (Quadro 3.29). Determinou-se ainda a resistência conservada para avaliar a sensibilidade à água das misturas, tomando como referência a norma militar americana MIL-STD-620A e a RILEM 17 BM/n.º 3.

Quadro 3.29 – Resumo das características das misturas correspondentes à percentagem óptima de betume, para as quatro composições estudadas

Característica	Limites	TR = 30%	TR = 40%	TR = 50%
Força de Rotura	8000 a 15000	10550	10200	10950
Deformação máxima	4 mm	3,3	4,1	3,6
VMA mínimo	13%	13,0	15,8	17,4
Porosidade (%)	4% a 6%	2,6	5,0	6,0
Resistência conservada	> 70%	87,4	92,0	100,0
Percentagem óptima de betume novo (%)		2,9	2,7	2,5
Percentagem óptima de betume total (%)		4,4	4,7	5,0
Relação ponderal filer betume	1,1 a 1,5	1,5	1,2	1,2

Como se pode observar, quase todas as características obtidas assumem valores satisfatórios. As únicas excepções são a deformação, que para a taxa de 40% ultrapassa em apenas 10^{-1} mm o limite, e a porosidade que para a taxa de 30% está um pouco abaixo do limite. Julga-se que este valor da porosidade estará associado à percentagem de filer usada, pelo que se deveria reformular a granulometria da mistura neste caso, reduzindo a percentagem de filer.

Para concluir o processo de formulação seguir-se-ia a transposição para trechos experimentais, usando a percentagem de betume determinada e outras duas (uma 0,5% abaixo e outra 0,5% acima). A decisão final sobre a fórmula para execução seria tomada em função dos resultados obtidos em ensaios de desempenho.

3.8 Considerações Finais

Este capítulo centrou-se essencialmente no tema da formulação de misturas betuminosas recicladas a quente. Um adequado estabelecimento da fórmula para execução de uma MBRQ, tal como o duma mistura betuminosa tradicional, dará mais garantias de um bom comportamento da mistura quando em serviço. E o desempenho das misturas não se pode dissociar das características mecânicas fundamentais da mistura, as quais, por sua vez, são condicionadas por diversos factores, entre os quais as características gerais das misturas e dos seus materiais constituintes.

Assim, primeiro, definiram-se alguns conceitos de base relativamente à composição das misturas, às características gerais dos materiais elementares e da mistura final e às características mecânicas fundamentais das misturas. De seguida, fez-se uma descrição dos principais ensaios usados na avaliação dessas propriedades das misturas, as quais explicam melhor os mecanismos de degradação que se observam nas misturas quando em serviço. Por esta razão, os métodos de formulação com base na medição directa das características mecânicas das misturas, nomeadamente as suas características de deformabilidade e de resistência à fadiga e à deformação permanente, são particularmente recomendados no estudo de misturas a aplicar em pavimentos de vias mais importantes.

As metodologias de formulação de misturas a quente, regra geral, são aplicáveis às MBRQ, pelo que se fez uma breve descrição dos métodos de formulação existentes. Descreveram-se então os métodos de formulação de MBRQ, dando mais atenção às fases em que os mesmos diferem da formulação das misturas tradicionais, nomeadamente no que respeita à caracterização do material fresado e à selecção do tipo de betume e/ou rejuvenescedor a usar.

Por fim, descreve-se o método de formulação seguido nos trabalhos experimentais e apresentou-se um exemplo de aplicação ao estudo de MBRQ que se pretendiam usar nos

trabalhos experimentais. Na metodologia usada, fez-se a selecção da percentagem de betume pelo método de *Marshall*, o qual tem sido usado na formulação de MBRQ (*Asphalt Institute*, 1986; AIPCR, 2003; Bardesi *et al.*, 2002). O método de *Marshall*, apesar das limitações que lhe são apontadas, é o mais usado em Portugal no estudo das misturas a quente, pelo que, desde que complementado com a realização de ensaios de desempenho, constitui uma solução aceitável no estudo das MBRQ. No Capítulo 6 será proposta uma metodologia de formulação que considera duas hipóteses: o método de *Marshall* e a formulação volumétrica com a PCG.

3.9 Referências Bibliográficas

- Asphalt Institute (1986). “Asphalt Hot-Mix Recycling”. Manual Series n.º 20. Second Edition, Lexington, Kentucky, EUA.
- AFNOR (1992). “Essais relatifs aux chaussées - Essais statiques sur mélanges hydrocarbonés”, Partie 1: Essai Duriez sur mélanges hydrocarbonés à chaud”. *NF P 98-251-1*, Association Française de Normalisation, Paris, França.
- AFNOR (1990). “Granulats: Essai au bleu de méthylène – méthode à la tache”. *NF P 18-592*, Association Française de Normalisation, Paris, França.
- AIPCR (2003). “Pavement Recycling Guidelines for: In-Place Recycling with Cement; In-Place Recycling with Emulsion or foamed bitumen; Hot Mix Recycling in Plant”. Association Mondiale de la Route (ISBN 2-84060-154-0). La Defense - França.
- APORBET (1998). “Misturas Betuminosas: Contribuição para a normalização do fabrico e da aplicação”. Associação Portuguesa de Fabricantes de Misturas Betuminosas, Lisboa.
- ASTM (2005). “Standard Test Method for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer”. *D 7175-05*, American Society for Testing and Materials, EUA.
- ASTM (2004). “Standard Test Method for Bulk Specific Gravity and Density of Non-Absorptive Compacted Bituminous Mixtures”. *D 2726-04*, American Society for Testing and Materials, EUA.
- ASTM (2003-a). “Standard Test Method for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Bituminous Paving Mixtures”. *D 2041-03a*, American Society for Testing and Materials, EUA.
- ASTM (2003-b). “Standard Practice for Accelerated Aging of Asphalt Binder Using a Pressurized Aging Vessel (PAV)”. *D 6521-03a*, American Society for Testing and Materials, EUA.
- ASTM (2003-c). “Standard Practice for Recovery of Asphalt from Solution Using the Rotary Evaporator”. *D 5404-03*, American Society for Testing and Materials, EUA.
- ASTM (2002-a). “Standard Test Method for Flash and Fire Points by Cleveland Open Cup Tester”. *D 92-02b*, American Society for Testing and Materials, EUA.
- ASTM (2002-b). “Standard Test Method for Determining the Fracture Properties of Asphalt Binder in Direct Tension”. *D 6723-02*, American Society for Testing and Materials, EUA.

- ASTM (2001-a). “Standard Test Method for Kinematic Viscosity of Asphalts (Bitumens)”. *D 2170-01a*, American Society for Testing and Materials, EUA.
- ASTM (2001-b). “Standard Test Method for Solubility of Asphalt Materials in Trichloroethylene”. *D 2042-01*, American Society for Testing and Materials, EUA.
- ASTM (2001-c). “Standard Test Method for Determining the Flexural Creep Stiffness of Asphalt Binder Using the Bending Beam Rheometer (BBR)”. *D 6648-01*, American Society for Testing and Materials, EUA.
- ASTM (2001-d). “Standard Test Methods for Quantitative Extraction of Bitumen From Bituminous Paving Mixtures”. *D 2172-01*, American Society for Testing and Materials, EUA.
- ASTM (1999-a). “Standard Specification for Performance Graded Asphalt Binder”. *D 6373-99*, American Society for Testing and Materials, EUA.
- ASTM (1999-b). “Standard Practice for Preparation of Viscosity Blends for Hot Recycled Bituminous materials”. *D 4887-99*, American Society for Testing and Materials, EUA.
- ASTM (1998). “Standard Test Method for Asphalt Content of Hot-Mix Asphalt by Ignition Method”. *D 6307-98*, American Society for Testing and Materials, EUA.
- ASTM (1997-a). “Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials”. *D 5-97*, American Society for Testing and Materials, EUA.
- ASTM (1997-b). “Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test)”. *D 2872-97*, American Society for Testing and Materials, EUA.
- ASTM (1997-c). “Standard Test Method for Effects of Heat and Air on Asphaltic Materials (Thin-Film Oven Test)”. *D 1754-97*, American Society for Testing and Materials, EUA.
- ASTM (1997-d). “Standard Practice for Classifying Emulsified Recycling Agents”. *D 5505-97*, American Society for Testing and Materials, EUA.
- ASTM (1996). “Standard Test Method for Effect of Water on Compressive Strength of Compacted Bituminous Mixtures”. *D 1075-96*, American Society for Testing and Materials, EUA.
- ASTM (1995). “Standard Test Method for Softening Point of Bitumen (Ring and Ball Apparatus)”. *D 36-95*, American Society for Testing and Materials, EUA.
- ASTM (1992-a). “Standard Specification for Viscosity-Graded Asphalt Cement for Use in pavement Construction”. *D 3381-92*, American Society for Testing and Materials, EUA.
- ASTM (1992-b). “Standard Test Methods for Resistance to Deformation and Cohesion of Bituminous Mixtures by Means of Hveem Apparatus”. *D 1560-92*, American Society for Testing and Materials, EUA.
- ASTM (1992-c). “Standard Practice for Classifying Hot-Mix Recycling Agents”. *D 4552-92*, American Society for Testing and Materials, EUA.
- ASTM (1992-d). “Standard Practice for Preparation of Bituminous Mixture Test Specimens by Means of California Kneading Compactor”. *D 1561-92*, American Society for Testing and Materials, EUA.

- ASTM (1989). “Standard Test Method for Resistance to Plastic Flow of Bituminous Mixtures Using *Marshall* Apparatus”. *D 1559-89*, American Society for Testing and Materials, EUA.
- ASTM (1982). “Standard Specification for Penetration-Graded Asphalt Cement for Use in Pavement Construction”. *D 946-82*, American Society for Testing and Materials, EUA.
- AUSTROADS (2006-a). “Guide to Pavement Technology - Part 4B: Asphalt, Appendix A, Mix Design Procedures”. Austroads, Sydney, Austrália.
- AUSTROADS (2006-b). “Asphalt Recycling”. AP-T66/06. Austroads, Sydney, Austrália.
- AUSTROADS (2000). “Framework specifications for asphalt recycling”. AP-T02/00, Austroads, Sydney, Austrália.
- Baptista, A. M. e Picado-Santos, L. (2002). “Estruturas de Pavimento Rodoviário Flexível”. Actas do 2.º Congresso Rodoviário Português - Estrada 2002, Centro Rodoviário Português, Lisboa.
- Bardesi, A., Páez, A. e Moreno, E. (2002). “Ligantes bituminosos para mezclas recicladas en caliente”. Carreteras (Especial Reciclado de Firmes), Revista Técnica de la Asociación Española de la Carretera, n.º 118, pp. 45-56.
- Branco, F., Pereira, P. e Picado-Santos, L. (2005). “*Pavimentos Rodoviários*”. Edições Almedina (ISBN 972-40-2648-5), Coimbra.
- Branco, F., Picado-Santos, L. e Capitão, S. (2000). “Vias de Comunicação: volume 2”. Departamento de Engenharia Civil da F.C.T. da Universidade de Coimbra, edição de 2000/2001, Coimbra.
- BSI (1985). “Testing aggregates, Part 105: Methods for determination of particle shape”. *BS 812: Section 105.1 and Section 105.2*, British Standard Institution, Londres.
- Capitão, S. (2003). “Caracterização Mecânica de Misturas Betuminosas de Alto Módulo de Deformabilidade”. Tese de Doutoramento, Departamento de Engenharia Civil da F.C.T. da Universidade de Coimbra, 2 vol., Coimbra.
- CEN (2005-a). “Bitumen and bituminous binders - Accelerated long-term ageing - Pressure Ageing Vessel (PAV)”. *EN 14769*, European Committee for Standardization, Bruxelas.
- CEN (2005-b). “Bituminous mixtures - Material specifications - Part 8: Reclaimed asphalt”. *EN 13108-8*, European Committee for Standardization, Bruxelas.
- CEN (2005-c). “Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 25: Cyclic compression test”. *EN 12697-25*, European Committee for Standardization, Bruxelas.
- CEN (2005-d). “Bitumen and bituminous binders - Determination of complex shear modulus and phase angle - Dynamic Shear Rheometer (DSR)”. *EN 14770*, European Committee for Standardization, Bruxelas.
- CEN (2005-e). “Bitumen and bituminous binders - Determination of the flexural creep stiffness - Bending Beam Rheometer (BBR)”. *EN 14771*, European Committee for Standardization, Bruxelas.
- CEN (2004-a). “Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 39: Binder content by ignition”. *EN 12697-39*, European Committee for Standardization, Bruxelas.

- CEN (2004-b). “Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 34: *Marshall test*”. *EN 12697-34*, European Committee for Standardization, Bruxelas.
- CEN (2004-c). “Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 26: Stiffness”. *EN 12697-26*, European Committee for Standardization, Bruxelas.
- CEN (2004-d). “Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 24: Resistance to fatigue”. *EN 12697-24*, European Committee for Standardization, Bruxelas.
- CEN (2003-a). “Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 6: Determination of bulk density of bituminous specimens”. *EN 12697-6*, European Committee for Standardization, Bruxelas.
- CEN (2003-b). “Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 12: Determination of the water sensitivity of bituminous specimens”. *EN 12697-12*, European Committee for Standardization, Bruxelas.
- CEN (2003-c). “Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 22: Wheel tracking”. *EN 12697-22*, European Committee for Standardization, Bruxelas.
- CEN (2003-d). “Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 23: Determination of the indirect tensile strength of bituminous specimens”. *EN 12697-23*, European Committee for Standardization, Bruxelas.
- CEN (2002). “Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 5: Determination of the maximum density”. *EN 12697-5*, European Committee for Standardization, Bruxelas.
- CEN (2001). “Bitumen and bituminous binders - determination of flash and fire points - Cleveland open cup method”. *EN 2592*, European Committee for Standardization, Bruxelas.
- CEN (2000-a). “Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 1: Soluble binder content”. *EN 12697-1*, European Committee for Standardization, Bruxelas.
- CEN (2000-b). “Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 3: Bitumen recovery: Rotary evaporator”. *EN 12697-3*, European Committee for Standardization, Bruxelas.
- CEN (2000-c). “Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 4: Bitumen recovery: Fractionating column”. *EN 12697-4*, European Committee for Standardization, Bruxelas.
- CEN (1999-a). “Bitumen and bituminous binders - Specifications for paving grade bitumens”. *EN 12591*, European Committee for Standardization, Bruxelas.
- CEN (1999-b). “Bitumen and bituminous binders - Determination of needle penetratiopn”. *EN 1426*, European Committee for Standardization, Bruxelas.
- CEN (1999-c). “Bitumen and bituminous binders - Determination of softening point: Ring and Ball method”. *EN 1427*, European Committee for Standardization, Bruxelas.
- CEN (1999-d). “Bitumen and bituminous binders - Determination of kinematic viscosity”. *EN 12595*, European Committee for Standardization, Bruxelas.

- CEN (1999-e). “Bitumen and bituminous binders - Determination of solubility”. *EN 12592*, European Committee for Standardization, Bruxelas.
- CEN (1999-f). “Determination of the resistance to hardening under influence of heat and air - Part 1: RTFOT method”. *EN 12607-1*, European Committee for Standardization, Bruxelas.
- CEN (1999-g). “Determination of the resistance to hardening under influence of heat and air - Part 2: TFOT method”. *EN 12607-2*, European Committee for Standardization, Bruxelas.
- Christensen, D., Bonaquist, R. (2006). “Volumetric Requirements for *Superpave* Mix Design”. NCHRP Report n.º 567, Washington, D.C.
- CRR (1997). “Code de Bonne Pratique pour la Formulation des Enrobés Bitumineux”. Centre de Recherches Routières, R 69/97, Bruxelas.
- Di Benedetto, H., De la Roche, C. e Francken, J., (1998). “State of the art on stiffness modulus and fatigue of bituminous mixtures”, Bituminous binders and mixes: state of the art and interlaboratory tests on mechanical behaviour and mix design, RILEM Report 17, Ed. L. Francken, Londres.
- FHWA (2001). “*Superpave* Mixture Design Guide”. Federal Highway Administration (WesTrack Forensic Team Consensus Report), U. S. Department of Transportation, Washington-DC.
- Francken, L. (1998). “Bituminous Binders and Mixes: State of the Art and Interlaboratory Tests on Mechanical Behaviour”. Report of RILEM Technical Committee 152-PBM (Performance of Bituminous Material), RILEM Report 17, E & FN Spon, Londres.
- Freire, A. (2002). “Deformações Permanentes de Misturas Betuminosas em Pavimentos Rodoviários”. Tese de Doutoramento, Departamento de Engenharia Civil da F.C.T. da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Gardete, D. (2005). “Comparação de Ensaios Laboratoriais para a Caracterização de Misturas Betuminosas à Deformação Permanente”. Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da F.C.T. da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Harman, T., D'Angelo, J. e Bukowski, J. (2002). “*Superpave* Asphalt Mixture Design Workshop (Workbook)”. Federal Highway Administration, U. S. Department of Transportation, version 8.0, Washington-DC.
- Harrigan, E. (2001). “Recommended Use of Reclaimed Asphalt Pavement in the *Superpave* Mix Design Method: Guidelines”. National Research Council, Research Results Digest, n.º 253, Washington-DC.
- Harrigan, E. e Youtchef, J. (1994). “The *Superpave* Mix Design System Manual Specifications, Test Methods and Practices”. National Research Council (Strategic Highway Research Program). Report N.º SHRP-A-379, Washington-DC.
- Ibarra, J. (2003). “Estudio del Comportamiento de Mezclas Bituminosas Recicladadas en Caliente en Planta”. Tese de Doutoramento, Universidade Politécnica da Catalunha, Barcelona.

- IGPAI (1973). “Inertes para argamassas e betões: determinação das massas volúmicas e da absorção de água de areias”. NP-954, Inspeção Geral dos produtos Agrícolas e Industriais, Lisboa.
- IGPAI (1969). “Inertes para argamassas e betões: determinação das massas volúmicas e da absorção de água de britas e godos”. NP-581, Inspeção Geral dos produtos Agrícolas e Industriais, Lisboa.
- JAE (1998). “Caderno de Encargos: 03-pavimentação”. JAE (actual EP), volume V, Almada.
- Kandhal, P. e Mallick, R. (1997). “Pavement Recycling Guidelines for State and Local Governments”. Report n.º FHWA-SA-98-042. Federal Highway Administration. Washington-DC.
- LCPC@ (2003). http://www.lcpc.fr/fr/produits/materiels_mlpc/, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (página Internet oficial), Paris.
- LNEC (2006). “Guia para a Reciclagem de Misturas Betuminosas a Quente em Central”. LNEC E 472, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
- LNEC (1997). “Betumes de Pavimentação: Classificação, propriedades e exigências de conformidade”. LNEC E 80, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
- LNEC (1969-a). “Agregados. Análise granulométrica”. LNEC E 233, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
- LNEC (1969-b). “Agregados: ensaio de desgaste pela máquina de Los Angeles”. LNEC E 237, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
- LNEC (1967). “Ensaio de equivalente de areia”. LNEC E 199, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
- McDaniel, R. e Anderson, R. (2001). “Recommended Use of Reclaimed Asphalt Pavement in the *Superpave* Mix Design Method: Technician’s manual”. NCHRP Report n.º 452, Washington, D.C.
- Marín, C. B. (2001). “Estudio y diseño de la mezcla. Normativa española”. Jornadas sobre Mezclas Bituminosas Recicladas en Caliente, Félix Edmundo Pérez Jiménez y Rodrigo Miro Recasens (eds.), pp. 83-108.
- Ministerio de Fomento (2001). “Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Conservación de Carreteras (PG-4). Artículo 22 - Reciclado en caliente de capas bituminosas”. Dirección General de carreteras, Orden Circular 8/01, Madrid, Espanha.
- Momm, L. (2005). “Máquina de ensaio de fadiga a deformação controlada em modo contínuo”. Actas do XIII CILA - Congresso Ibero-Latinoamericano del Asfalto, CD Ed., Costa Rica.
- Picado-Santos, L. P. (2005). “Formulação de Misturas Betuminosas a Quente”. Sumário da Lição de Síntese da Agregação. Departamento de Engenharia Civil da F.C.T. da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Picado-Santos, L. P. (2003). “Reciclagem de Pavimentos”. Actas do Seminário de Engenharia Rodoviária. Escola Superior de Tecnologia de Viseu, Viseu.

4 TRABALHOS EXPERIMENTAIS

4.1 Considerações Iniciais

Este capítulo trata principalmente da descrição dos trabalhos experimentais levados a cabo neste estudo. Depois de identificar as misturas que se estudaram, faz-se uma descrição detalhada do estabelecimento da composição de base das misturas. Conhecidas as “receitas” das misturas, descrevem-se as fases de execução dos trechos experimentais e faz-se referência à produção e compactação das misturas em laboratório.

De seguida, aborda-se a questão da obtenção dos provetes necessários à realização dos ensaios de desempenho, verificam-se as características das misturas aplicadas nos trechos experimentais e indicam-se as características gerais das misturas compactadas em laboratório. Por fim, é dada atenção aos procedimentos seguidos na realização dos ensaios de desempenho, nomeadamente no que respeita aos equipamentos utilizados e às condições de ensaio adoptadas, e apresenta-se os resultados da avaliação de capacidade de carga com deflectómetro de impacto (*Falling Weight Deflectometer*, FWD).

4.2 Tipos de Misturas Consideradas no Estudo

Estudaram-se vinte e quatro misturas betuminosas: doze foram aplicadas em trechos experimentais (três de referência e nove recicladas) e as restantes foram produzidas e compactadas em laboratório (três de referência e nove recicladas).

Nos trechos experimentais estudaram-se misturas com taxas de reciclagem de 20%, 30% e 40% e ainda misturas de referência sem incorporação de material fresado. Admitiram-se três percentagens de betume por taxa de reciclagem, resultando assim as doze misturas referidas. A mistura betuminosa de referência foi um macadame betuminoso a usar em camada de base ou de regularização com espessura não superior a 10 cm (Fuso A). Estas constituem o grupo de misturas de *macadame betuminoso aplicado nos trechos experimentais* (MBTE).

Em laboratório produziram-se e compactaram-se misturas idênticas às anteriores, mas com igual percentagem de betume total. Quatro produziram-se com o mesmo betume usado nas misturas dos trechos experimentais (35/50) e iguais taxas de reciclagem, e outras quatro com betumes mais brandos (50/70 e 70/100) e para as taxas de reciclagem de 30% e 40%. Ao

longo do texto, este é o designado conjunto de misturas de *macadame betuminoso produzido e compactado em laboratório*. (MBLB).

Finalmente, as misturas de *betão betuminoso produzido e compactado em laboratório* (BDLB). Além das misturas de macadame betuminoso, produziram-se em laboratório quatro misturas de betão betuminoso, sendo duas de referência, sem qualquer material fresado (com duas percentagens de betume) e duas recicladas com incorporação de 30% de material fresado (duas percentagens de betume).

No Quadro 4.1 indica-se, para cada grupo de misturas, o número de misturas de referência, recicladas e total.

Quadro 4.1 – Tipo e número de misturas consideradas nos trabalhos experimentais

Grupo de misturas	Misturas de referência	Misturas recicladas	TOTAL
MBTE	3	9	12
MBLB	1	7	8
BDLB	2	2	4
TOTAL	6	18	24

4.3 Estabelecimento da Composição de Base das Misturas

4.3.1 Macadame betuminoso aplicado nos trechos experimentais (MBTE)

Inserido no processo de formulação adoptado, descrito no capítulo anterior, pretendia-se nesta fase obter composições de base a validar posteriormente através da realização de ensaios de desempenho.

Para estabelecer a composição de base, depois da caracterização dos materiais (material fresado, agregados e betume), determina-se a composição granulométrica da mistura, selecciona-se o tipo de betume e a respectiva percentagem a usar.

- Caracterização do material fresado

No mínimo, deve avaliar-se a granulometria do agregado do fresado após a extracção do ligante, conhecer a percentagem de betume e determinar a penetração a 25°C e a temperatura de amolecimento pelo método do anel e bola.

Avaliou-se a granulometria de três amostras de material fresado, sem qualquer desagregação, tendo-se observado uma dimensão 0/40 mm. Na Figura 4.1 apresentam-se as respectivas curvas granulométricas.

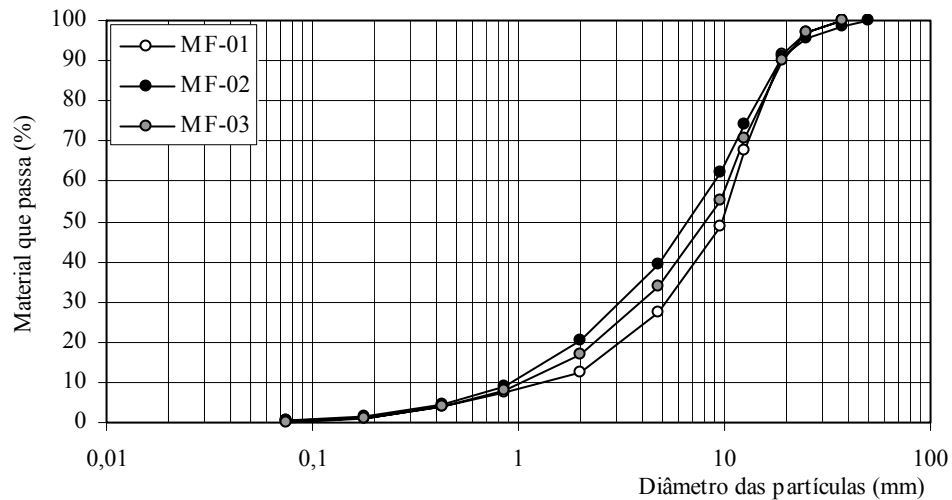


Figura 4.1 – Curvas granulométricas de três amostras de material fresado usado nas misturas de macadame betuminoso (sem desagregação)

A seguir determinou-se a percentagem de betume pelo método de incineração, segundo a norma ASTM D 6307, usando o equipamento da Figura 4.2. Visto que o material fresado era da mesma origem do exemplo de formulação do Capítulo 3 (Picado-Santos e Baptista, 2003), tomou-se como referência igual valor do factor de correcção da percentagem de betume. No Quadro 4.2 indicam-se os resultados obtidos com as três amostras.



Figura 4.2 – Equipamento usado na determinação da percentagem de betume por incineração

Quadro 4.2 – Percentagem de betume do material fresado usado nos trechos experimentais

Amostra	Massa total (g)	Massa de agregado (g)	Factor de correcção	Massa de betume corrigida (g)	Percentagem de betume (%)
MF-01	3000,1	2859,6	1,0067	121,3	4,0
MF-02	2993,7	2849,8	1,0067	124,8	4,2
MF-03	3000,6	2855,8	1,0067	125,7	4,2

Chegou-se assim a uma percentagem de betume média de 4,1% e mais frequente de 4,2% (duas determinações em três), valores estes um pouco baixos, tendo presente que o material fresado provém de camadas superiores do pavimento e onde as misturas betuminosas apresentam, em geral, percentagens de betume um pouco mais altas. Todavia, adoptou-se no trabalho o valor médio de 4,1%.

Após a incineração do betume existente no material fresado, prepararam-se três amostras de agregados para análise granulométrica de acordo com a especificação E 233-LNEC. No Quadro 4.3 indicam-se os resultados da análise granulométrica e na Figura 4.3 pode observar-se a diferença entre a granulometria média do material fresado (0/40 mm), antes da incineração, e do agregado do material fresado após a extracção do betume (0/20 mm).

Quadro 4.3 – Resultados da análise granulométrica do agregado do material fresado usado nas misturas de macadame betuminoso aplicadas nos trechos experimentais (após incineração)

Peneiro ASTM	Abertura das malhas (mm)	Percentagem acumulada do material que passa (%)			
		AGF-01	AGF-02	AGF-03	Valor Médio
1"	25,0	100,0	100,0	100,0	100,0
3/4"	19,0	100,0	99,5	98,5	99,3
1/2"	12,5	89,6	93,8	91,4	91,6
3/8"	9,5	73,7	83,1	79,3	78,7
n.º 4	4,75	46,5	58,7	54,3	53,2
n.º 10	2,00	29,6	37,6	36,3	34,5
n.º 20	0,850	19,1	23,1	21,0	21,1
n.º 40	0,425	12,7	14,6	12,6	13,3
n.º 80	0,180	6,5	7,1	5,6	6,4
n.º 200	0,075	2,4	2,1	1,7	2,1

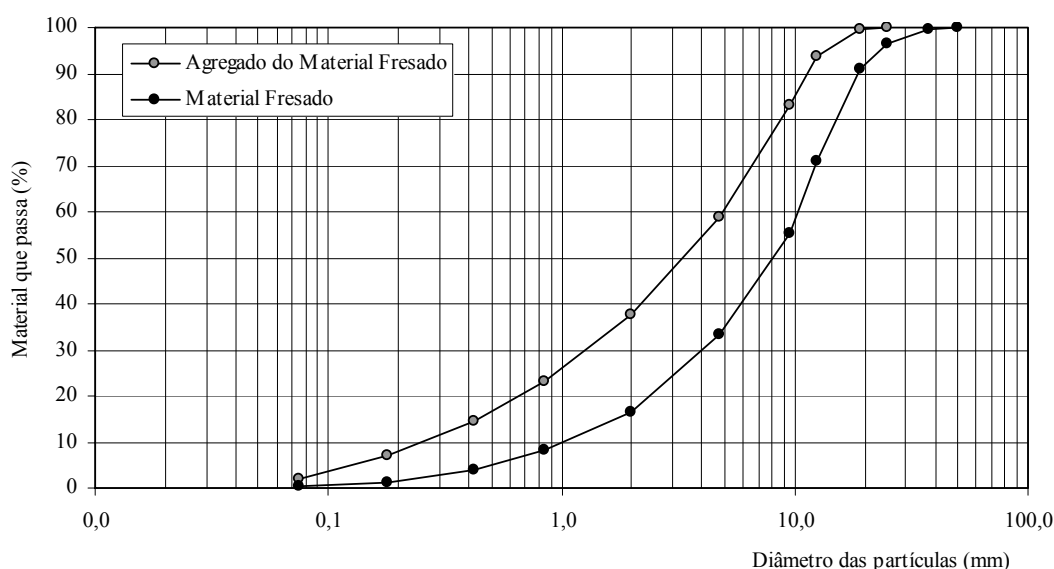


Figura 4.3 – Curvas granulométricas do material fresado (com e sem betume)

Fez-se a recuperação do betume existente no material fresado em evaporador rotativo (Figura 4.4), para posterior caracterização do mesmo, seguindo o procedimento de “*Recuperação de betumes de misturas betuminosas para caracterização dos mesmos*”, à data seguido pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC).



Figura 4.4 – Evaporador rotativo usado na recuperação de betume

Sobre o ligante recuperado efectuaram-se os habituais ensaios de caracterização: a penetração a 25°C e a determinação do ponto de amolecimento pelo método do anel e bola. Os resultados obtidos apresentam-se no Quadro 4.4 e revelam um betume com características idênticas ao do exemplo do Capítulo 3.

Quadro 4.4 – Características do betume recuperado do material fresado usado nas misturas dos trechos experimentais

Amostra	Penetração a 25°C, 100 g, 5 seg (10^{-1} mm)	Temperatura de anel e bola (°C)
BA-02	14	71

- Caracterização dos materiais novos

Os agregados novos usados, de natureza calcária, são os mesmos referidos no exemplo do Capítulo 3 (britas 5/15 e 15/25, pó 0/5 e filer comercial). Após análise granulométrica obtiveram-se as curvas indicadas na Figura 4.5. A empresa parceira no estudo forneceu os materiais e alguns dados relativos às características físicas dos agregados que se resumem no Quadro 4.5. Verifica-se que os materiais cumprem os limites definidos no CEEP (JAE, 1998), para macadame betuminoso (Fuso A) indicados no mesmo quadro. Na produção das misturas usou-se betume asfáltico 35/50, o único disponível na central, caracterizado por uma penetração a 25°C de $39 \cdot 10^{-1}$ mm e temperatura de amolecimento pelo método do anel e bola de 52°C.

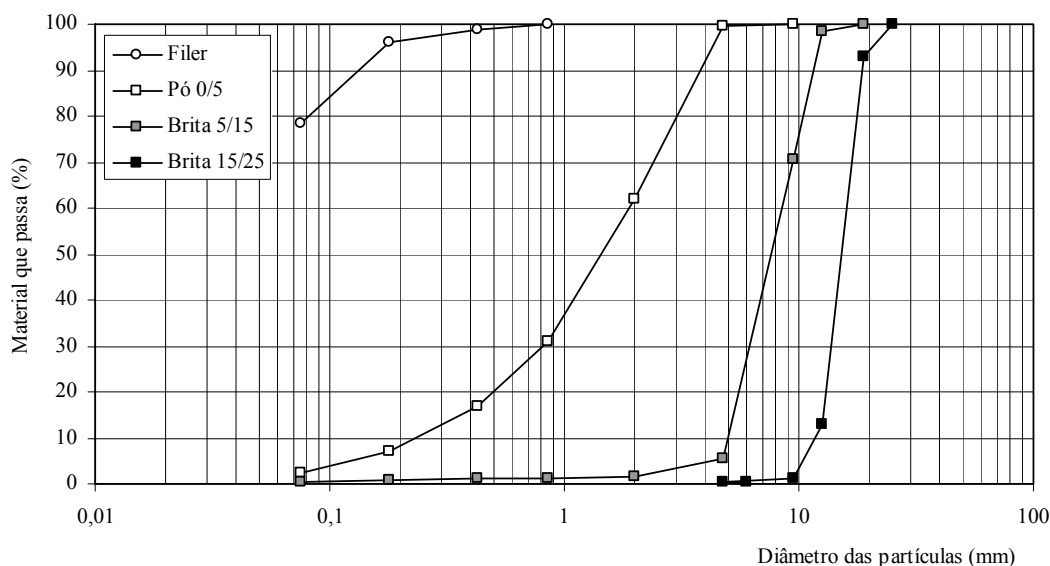


Figura 4.5 – Curvas granulométricas dos agregados novos usados no fabrico das misturas de macadame betuminoso dos trechos experimentais

Quadro 4.5 – Características físicas dos agregados calcários

Fracção	Massa volúmica (g/cm ³)	Absorção (%)	Desgaste de Los Angeles (%)	Índices de Forma		Equivalente de areia (%)	Valor do azul de metileno (g/100g)
				Lamelação (%)	Alongamento (%)		
15/25	2,69	0,8	32	17	14	-	-
5/15	2,69	0,8	-	18	20	-	-
0/5	2,68	1,1	-	-	-	67	0,3
CEEP	--	máx. 3,0	máx. 40	máx. 30	máx. 30	mín. 50	máx. 0,8

- Composição granulométrica

Determinou-se, para cada taxa de reciclagem, a composição granulométrica da mistura de agregados novos de modo a verificar o fuso granulométrico de macadame betuminoso (Fuso A). Assim, recorrendo ao habitual cálculo numérico, obtiveram-se as proporções indicadas no Quadro 4.6.

Quadro 4.6 – Composição granulométrica dos agregados usados nas misturas MBTE

Agregado	Proporção dos agregados na mistura de agregados (%)			
	TR = 0%	TR = 20%	TR = 30%	TR = 40%
Filer	5,0	5,2	5,6	6,0
Pó 0/5	41,5	30,4	24,5	18,6
Brita 5/15	23,5	16,4	12,6	9,0
Brita 15/25	30,0	28,0	27,3	26,4
Agregado do fresado	0,0	20,0	30,0	40,0

A representação gráfica da relação entre a taxa de reciclagem e a proporção de cada um dos agregados na mistura de agregados (valores do Quadro 4.6), que se apresenta na Figura 4.6, permite concluir que as proporções variam quase linearmente em função da taxa de reciclagem. Tal significa que para uma taxa de reciclagem diferente se poderá, sem grande erro, interpolar ou extrapolar para determinar a composição granulométrica correspondente.

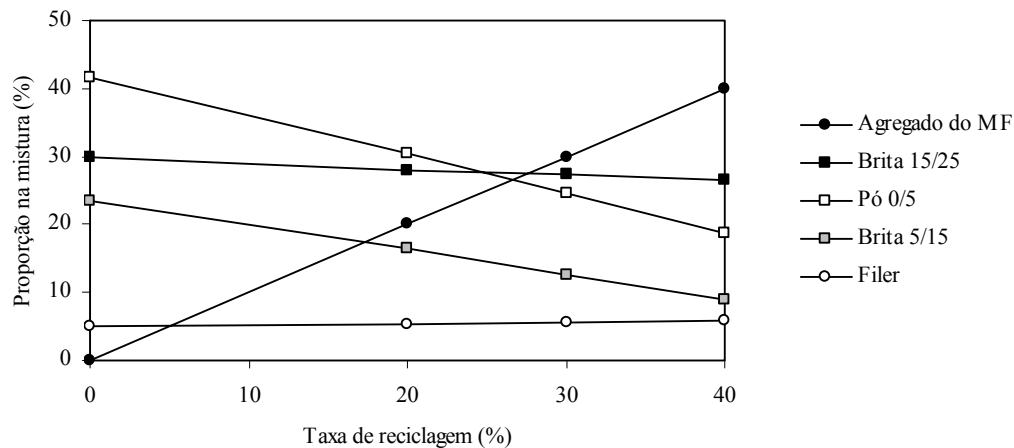


Figura 4.6 – Relação entre a taxa de reciclagem e a proporção dos agregados na mistura

O material fresado apresenta uma granulometria 0/20 com poucos finos. Por esta razão, as proporções de filer e da brita 15/25 pouco variam e as proporções de pó 0/5 e da brita 5/15 (existentes no material fresado) diminuem de forma bem visível com o aumento da taxa de reciclagem. Na Figura 4.7 mostra-se, como exemplo, o encaixe no fuso granulométrico para a taxa de reciclagem de 30%.

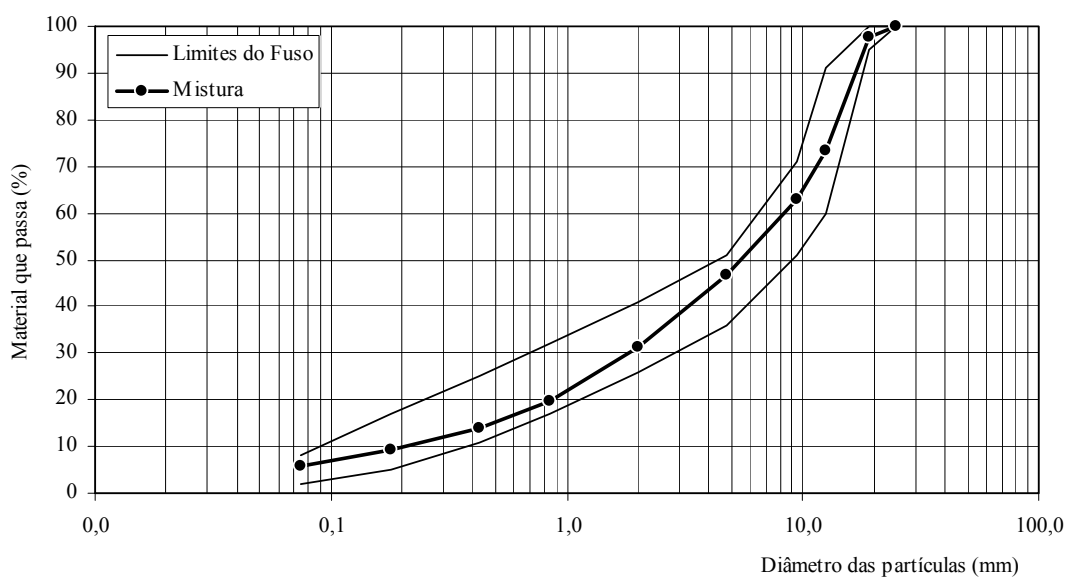


Figura 4.7 – Exemplo de verificação do fuso granulométrico (TR = 30%)

- Percentagem de betume a usar

Como se referiu, o material fresado disponível apresenta algumas diferenças relativamente ao do exemplo do Capítulo 3, nomeadamente ao nível da granulometria e da percentagem de betume, que é menor. Além disso, sendo o material fresado introduzido a frio, não seria aconselhável ir além dos 40% de incorporação de material fresado, o que levou a abandonar a taxa de reciclagem de 50% do estudo inicial e incluir a taxa de reciclagem de 20%. Todavia, embora fosse desejável, não foi possível proceder, em tempo útil, a um novo estudo de formulação pelo método de *Marshall* e à avaliação da sensibilidade à água.

Como alternativa, tomaram-se como referência os resultados dos estudos anteriores, para as taxas de 30% e 40%, complementados com outros critérios consubstanciados em documentos normativos nacionais habitualmente respeitados nos estudos de formulação de macadame betuminoso 0/25, e que se passam a expor.

Critério 1 - Considerar os resultados de estudo de formulação anterior

O estudo de formulação levado a cabo, pelo método de *Marshall* (Picado-Santos, 2003), apresentado como exemplo no capítulo anterior, conduziu às percentagens óptimas de betume de 4,4% e 4,7%, para as taxas de reciclagem de 30% e 40%.

Critério 2 - Respeitar a relação ponderal filer/betume

O CEEP exige, entre outras indicações, que a relação ponderal filer/betume (Rfb), para macadame betuminoso, se situe entre 1,1 e 1,5. Entende-se aqui o filer como o material de dimensão inferior a 75 µm, ou seja a percentagem de material da mistura de agregados passado no peneiro ASTM n.º 200 (p₂₀₀) multiplicada pela percentagem de agregado (pa). No Quadro 4.7 indicam-se, para cada taxa de reciclagem, p₂₀₀, e os limites obtidos para a percentagem de betume total na mistura reciclada a quente.

Quadro 4.7 – Limites da percentagem de betume (%) de acordo com a relação filer/betume

Parâmetro	TR = 0%	TR = 20%	TR = 30%	TR = 40%
p ₂₀₀	5,1	5,4	5,7	6,1
pb (mínima), Rfb = 1,5	3,3	3,5	3,7	4,0
pb (máxima), Rfb = 1,1	4,4	4,7	4,9	5,3

Critério 3 - Respeitar os limites do Manual de Concepção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional

Para macadame betuminoso 0/25, a usar em camada de base ou de regularização, o Manual de Concepção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional, adiante designado por MACOPAV (JAE, 1995), indica que o teor em betume (tb) deverá estar compreendido entre 4,0% e 4,8%, o que traduzido em termos de percentagem de betume, $pb = tb/(1 + pb)$, conduz ao intervalo de 3,8% a 4,6% e ao valor médio de 4,2%.

Critério 4 - Considerar a fórmula empírica com base na superfície específica

Finalmente, recorrendo à fórmula empírica com base na superfície específica, já referida e usada no capítulo 3, e que se reescreve:

$$pb = K \times F \times \sqrt[5]{Se}$$

em que,

pb – percentagem de betume residual;

K – módulo de riqueza em betume. Para o tipo de misturas em estudo varia de 2,5 a 3,5;

F – constante igual a $2,65/\rho_a$, sendo ρ_a a massa volúmica da mistura de agregados;

Se – superfície específica, estimada pela seguinte expressão:

$$Se = 0,25 S_1 + 2,3 S_2 + 12 S_3 + 135 p_{200}$$

onde,

S_1 – proporção ponderal de elementos de dimensão superior a 6,3mm;

S_2 – proporção ponderal de elementos de dimensão compreendida entre 0,315 mm e 6,3mm;

S_3 – proporção ponderal de elementos de dimensão compreendida entre 0,075 mm e 0,315mm;

p_{200} – proporção ponderal de elementos de dimensão inferior a 0,075mm.

Conhecida a massa volúmica das partículas secas dos agregados ($2,69 \text{ g/cm}^3$ para as duas britas, $2,68 \text{ g/cm}^3$ para o pó e $2,70 \text{ g/cm}^3$ para o filer), determinou-se a massa volúmica da mistura de agregados e a constante F para cada taxa de reciclagem. No Quadro 4.8 indicam-se os parâmetros envolvidos e a percentagem de betume de referência. Para o efeito, fixou-se o módulo de riqueza em betume ($K = 2,75$) que conduz a uma percentagem de betume de 4,2% para o macadame normal.

Quadro 4.8 – Resumo dos resultados da aplicação da fórmula da superfície específica (macadame betuminoso)

Parâmetro	TR = 0%	TR = 20%	TR = 30%	TR = 40%
$\rho_a (\text{g/cm}^3)$	2,686	2,687	2,687	2,688
F	0,986	0,986	0,986	0,986
S_1	47,2	47,7	48,0	48,3
S_2	42,5	41,3	40,3	39,3
S_3	5,2	5,7	6,0	6,3
p_{200}	5,1	5,4	5,7	6,1
Se	8,60	9,04	9,46	10,02
$pb_R (\%)$	4,2	4,2	4,3	4,3

Por fim, atendendo aos limites determinados, adoptaram-se as percentagens de betume indicadas no Quadro 4.9.

Quadro 4.9 – Resumo dos limites da percentagem de betume (%) e valores adoptadas

Critério	TR = 0%	TR = 20%	TR = 30%	TR = 40%
Critério 1	-	-	4,4	4,7
Critério 2	3,3 – 4,4	3,5 – 4,7	3,7 – 4,9	4,0 – 5,3
Critério 3	3,8 – 4,6	-	-	-
Critério 4	4,2	4,2	4,3	4,3
Percentagem de betume adoptada (pb _R)	4,2	4,3	4,4	4,7

Ora, os valores a que se chegou dizem respeito ao ligante final, havendo que determinar a percentagem de betume a adicionar, subtraindo-lhe a percentagem de betume do material fresado, usando a expressão (3.32).

$$pb_N = pb_R - pb_F \times TR$$

- TR = 20%, $pb_N = 4,3 - 5,1 \times 0,20 \approx \mathbf{3,5\%}$;
- TR = 30%, $pb_N = 4,4 - 5,1 \times 0,30 \approx \mathbf{3,2\%}$;
- TR = 40%, $pb_N = 4,7 - 5,1 \times 0,40 \approx \mathbf{3,1\%}$.

- Designação das misturas a estudar

Nos trechos experimentais, além da percentagem de betume de referência, admitiram-se para cada taxa de reciclagem, uma 0,5% abaixo e outra 0,5% acima. No Quadro 4.10 apresenta-se um resumo das doze misturas aplicadas nos trechos experimentais.

Quadro 4.10 – Resumo das misturas de macadame betuminoso aplicadas nos trechos experimentais (MBTE)

Número da Mistura	Designação da Mistura	TR (%)	Tipo de Betume	pb _R (%)	pb _N (%)
01	A1	0	35/50	—	3,7
02	A2	0	35/50	—	4,2
03	A3	0	35/50	—	4,7
04	B1	20	35/50	3,8	3,0
05	B2	20	35/50	4,3	3,5
06	B3	20	35/50	4,8	4,0
07	C1	30	35/50	3,9	2,7
08	C2	30	35/50	4,4	3,2
09	C3	30	35/50	4,9	3,7
10	D1	40	35/50	4,2	2,6
11	D2	40	35/50	4,7	3,1
12	D3	40	35/50	5,2	3,6

4.3.2 Macadame betuminoso produzido e compactado em laboratório (MBLB)

Em laboratório foram produzidas e compactadas misturas de macadame betuminoso idênticas às dos trechos experimentais, com as mesmas taxas de reciclagem e recorrendo aos mesmos materiais (agregados, betume 35/50 e material fresado).

Nestas misturas usou-se apenas uma percentagem de ligante global de 4,2% e não três por cada taxa de reciclagem como se fez nos trechos experimentais. Esta opção surgiu em consequência da análise dos resultados dos ensaios de desempenho realizados sobre as misturas dos trechos e que será tratada no capítulo seguinte.

Em contrapartida, além do betume 35/50, usado nos trechos experimentais, consideraram-se ainda dois outros betumes mais brandos (50/70 e 70/100), para as taxas de reciclagem mais altas (30% e 40%). Como foram usados materiais idênticos aos das misturas MBTE, as fórmulas de trabalho das misturas MBLB respeitaram, em termos de composição granulométrica, as proporções obtidas para as primeiras (ver Quadro 4.6).

No Quadro 4.11 apresenta-se um resumo das misturas de macadame betuminoso produzidas e compactadas em laboratório (MBLB) e no Quadro 4.12 indicam-se as características dos três betumes usados na sua produção laboratorial.

Quadro 4.11 – Resumo das misturas de macadame betuminoso produzidas e compactadas em laboratório (MBLB)

Número da Mistura	Designação da Mistura	TR (%)	Tipo de Betume	pb _R (%)	pb _N (%)
13	LA	0	35/50	—	4,2
14	LB	20	35/50	4,2	3,4
15	LC	30	35/50	4,2	3,0
16	LD	40	35/50	4,2	2,6
17	LE	30	50/70	4,2	3,0
18	LF	40	50/70	4,2	2,6
19	LG	30	70/100	4,2	3,0
20	LH	40	70/100	4,2	2,6

Quadro 4.12 – Características dos betumes usados nas misturas MBLB

Betume	Penetração a 25°C, 100 g, 5 seg (10 ⁻¹ mm)	Temperatura de anel e bola (°C)
35/50	39	52
50/70	55	50
70/100	86	47

4.3.3 Betão betuminoso produzido e compactado em laboratório (BDLB)

Estudou-se também a incorporação de material fresado numa mistura de betão betuminoso a usar em camada de desgaste ou em regularização subjacente a camada drenante ou camada de desgaste delgada. Não foi contudo possível aplicar esta mistura em trechos experimentais, tendo-se realizado apenas ensaios de desempenho sobre misturas de laboratório.

No estudo do betão betuminoso considerou-se a mistura de referência (sem material fresado) e uma taxa de reciclagem razoável (30%) e um só tipo de betume. Em cada caso, admitiram-se duas variantes em termos de granulometria: uma mistura grossa e uma mistura fina, seguindo método de formulação de misturas betuminosas fabricadas a quente proposto por Picado-Santos (2005).

- Caracterização do material fresado

Determinou-se a percentagem de betume existente no material fresado pelo método de incineração. No cálculo da percentagem de betume tomou-se como referência o mesmo valor do factor de correcção do estudo anterior. No Quadro 4.13 indicam-se os resultados a que se chegou para as duas amostras ensaiadas, assumindo a percentagem de betume um valor médio de 4,7%. Depois de extrair o ligante prepararam-se duas amostras de agregado do material fresado para análise granulométrica. No Quadro 4.14 indicam-se os resultados, que revelam granulometria muito semelhante. Verifica-se que a granulometria do material fresado, após incineração, é mais fina que a do material fresado usado no macadame (Figura 4.8).

Quadro 4.13 – Percentagem de betume do material fresado usado no betão betuminoso

Amostra	Massa total (g)	Massa de agregado (g)	Factor de correcção	Massa de betume corrigida (g)	Percentagem de betume (%)
MF-04	3054,0	2894,0	1,0067	140,7	4,6
MF-05	2966,0	2808,0	1,0067	139,3	4,7

Quadro 4.14 – Resultados da análise granulométrica do agregado do material fresado usado nas misturas de betão betuminoso

Peneiro ASTM	Abertura das malhas (mm)	Percentagem acumulada do material que passa (%)		
		GF-04	AGF-05	Valor Médio
5/8"	16,0	100,0	100,0	100,0
1/2"	12,5	98,8	99,2	99,0
3/8"	9,5	94,2	95,1	94,7
n.º 4	4,75	76,2	75,4	75,8
n.º 10	2,00	52,3	51,2	51,7
n.º 20	0,850	33,7	32,9	33,3
n.º 40	0,425	24,1	23,4	23,8
n.º 80	0,180	14,4	14,2	14,3
n.º 200	0,075	8,6	8,5	8,5

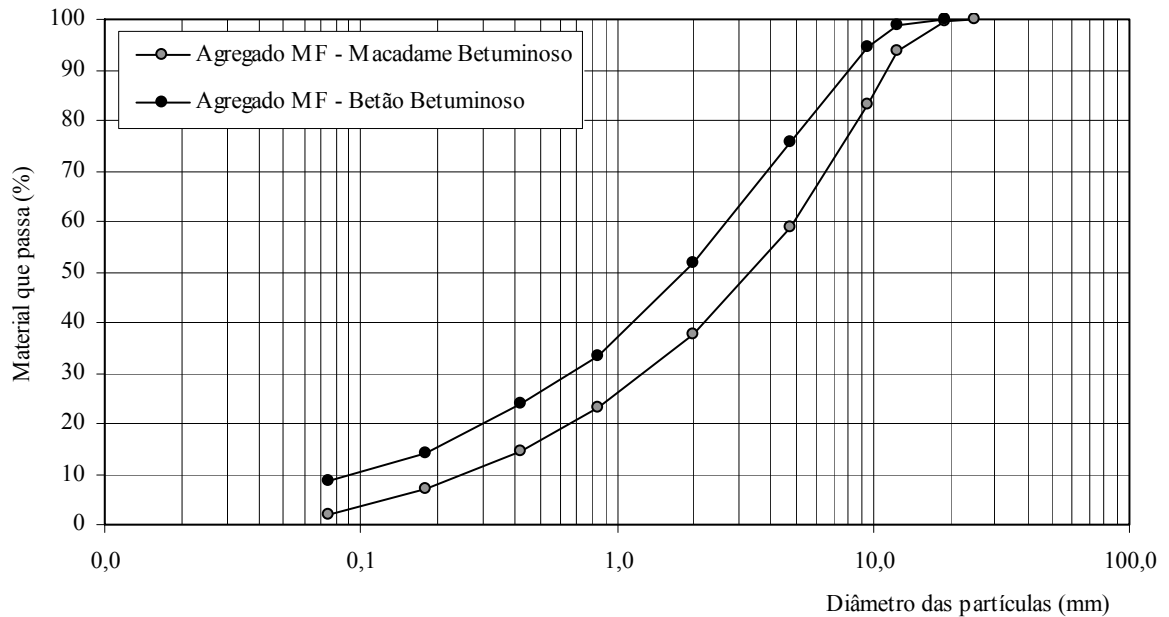


Figura 4.8 – Curvas granulométricas do agregado do material fresado usado nas misturas de macadame betuminoso (MBTE e MBLB) e de betão betuminoso (BDLB)

Fez-se a recuperação do betume do material fresado em evaporador rotativo, seguindo o já referido procedimento de “*Recuperação de betumes de misturas betuminosas para caracterização dos mesmos*”. O ligante recolhido foi caracterizado no que respeita à penetração a 25°C e ao ponto de amolecimento pelo método do anel e bola. Os resultados obtidos apresentam-se no Quadro 4.15 e denotam um ligante menos duro que o do material fresado usado no macadame.

Quadro 4.15 – Características do betume recuperado do material fresado usado nas misturas de betão betuminoso produzidas em laboratório

Amostra	Penetração a 25°C, 100 g, 5 s (10^{-1} mm)	Temperatura de Anel e Bola (°C)
BA-03	24	57

- Caracterização dos materiais novos

Usaram-se duas britas (5/10 e 10/15) e um pó (0/5), todos agregados graníticos, um pó calcário (0/5) e filer, habitualmente usados nas misturas de betão betuminoso pela empresa parceira no estudo e que os forneceu. Após análise granulométrica, obtiveram-se as curvas indicadas na Figura 4.9.

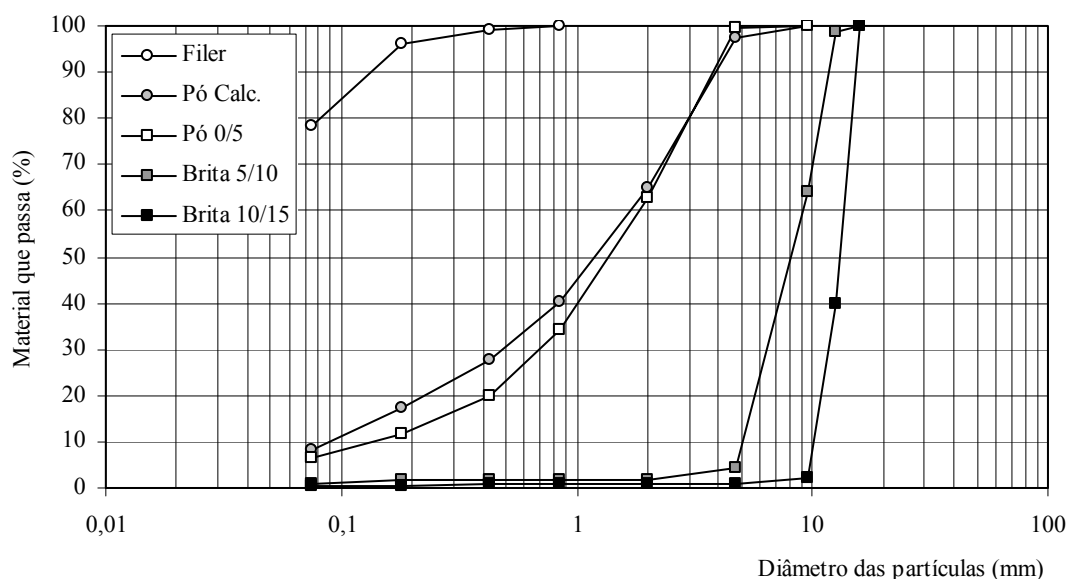


Figura 4.9 – Curvas granulométricas dos agregados novos usados nas misturas BDLB

A empresa forneceu os materiais e alguns dados relativos às características físicas dos agregados graníticos (Quadro 4.16). Verifica-se que os materiais cumprem os limites definidos no CEEP para betão betuminoso a aplicar em camada de desgaste, com a exceção do desgaste de *Los Angeles* que excede ligeiramente o limite. Contudo os materiais satisfazem plenamente os limites referentes a betão betuminoso subjacente a camada de desgaste drenante ou delgada. Na produção das misturas usou-se um betume asfáltico 50/70, caracterizado por uma penetração a 25°C de 52 10⁻¹ mm e temperatura de amolecimento pelo método do anel e bola de 51°C.

Quadro 4.16 – Características físicas dos agregados graníticos

Fracção	Massa volúmica (g/cm ³)	Absorção (%)	Desgaste de <i>Los Angeles</i> (%)	Índices de Forma		Equivalente de areia (%)	Valor do azul de metileno (g/100g)
				Lamelacção (%)	Alongamento (%)		
10/15	2,63	0,6	24	11	9	-	-
5/10	2,63	0,6	-	14	12	-	-
0/5	2,62	0,7	-	-	-	65	0,3
CEEP (desgaste)		máx. 2,0	máx. 20	máx. 25	máx. 25	mín. 60	máx. 0,8
CEEP (subjacente)		máx. 3,0	máx. 35	máx. 30	máx. 30	mín. 50	máx. 0,8

- Composição granulométrica

Determinou-se a composição granulométrica da mistura de agregados novos, admitindo, em cada caso, duas composições para as misturas, uma mais grossa e outra mais fina, e de forma a respeitar o fuso previsto no CEEP para o betão betuminoso a aplicar em camadas de desgaste na faixa de rodagem. Usando a metodologia habitual, obtiveram-se as proporções indicadas no Quadro 4.17. Designaram-se as quatro composições em estudo da seguinte

forma: BB-FN e BB-GR, as misturas de referência, e BR-FN e BR-GR as referentes às misturas recicladas, significando o índice "FN" granulometria fina, e o "GR" granulometria grossa. No caso das misturas de referência (BB-FN e BB-GR), por não terem material fresado, estabeleceu-se a composição sem limitações (Figura 4.10).

Quadro 4.17 – Composição das misturas de agregados (novos e do MF) usadas na formulação do betão betuminoso

Agregado	Proporção dos agregados na mistura de agregados (%)			
	TR = 0%		TR = 30%	
	BB-FN	BB-GR	BR-FN	BR-GR
Filer	3,0	3,0	4,0	4,0
Pó Calc.	25,0	21,0	15,0	11,0
Pó 0/5	25,0	21,0	15,0	11,0
Brita 5/10	30,0	35,0	19,0	24,0
Brita 10/15	17,0	20,0	17,0	20,0
Agregado do MF	0,0	0,0	30,0	30,0

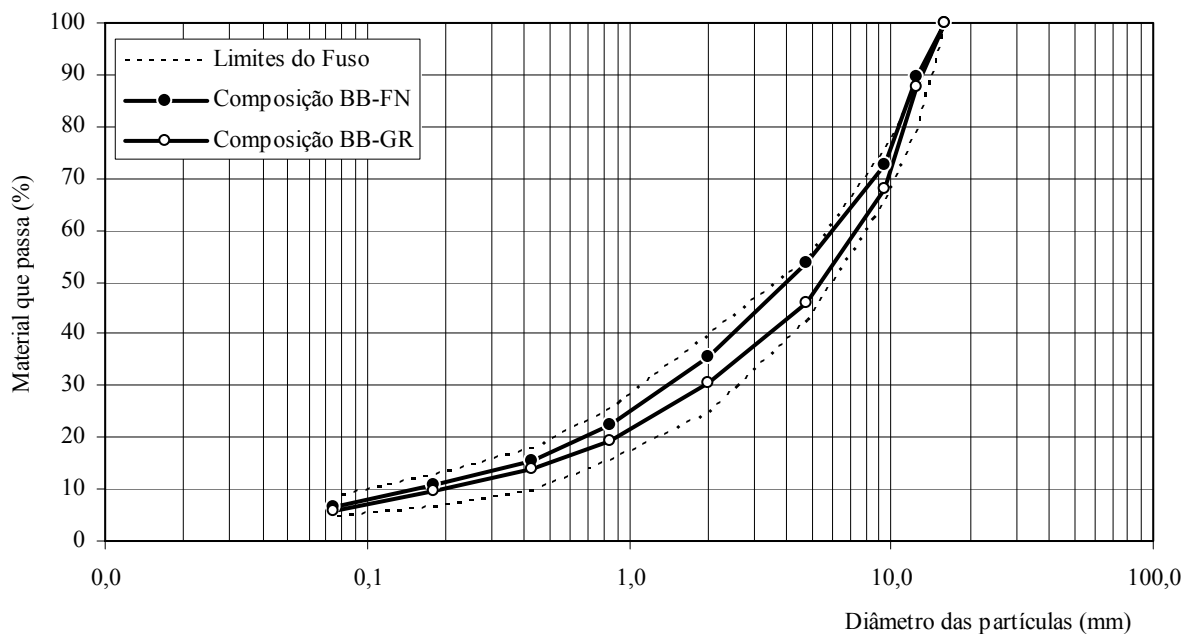


Figura 4.10 – Encaixe das composições BB-FN e BB-GR no fuso granulométrico

A curva granulométrica da mistura de agregados das composições BR-FN e BR-GR, apresentam o andamento das Figura 4.11 e 4.12. A mistura com granulometria fina encontra-se propositadamente no limite superior do fuso. Pretendia-se também uma composição com granulometria grossa mais próxima do limite inferior do fuso. Contudo, a granulometria dos agregados disponíveis e do agregado do material fresado, não o permitiu completamente.

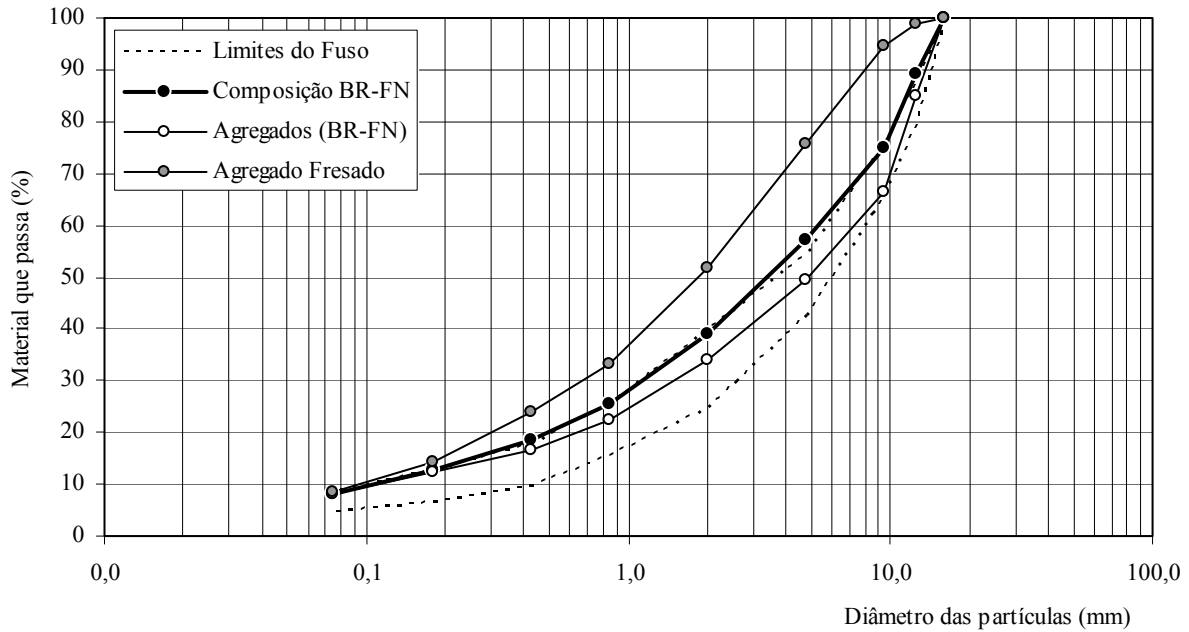


Figura 4.11 – Curvas granulométricas dos constituintes e posicionamento da composição BR-FN no fuso granulométrico

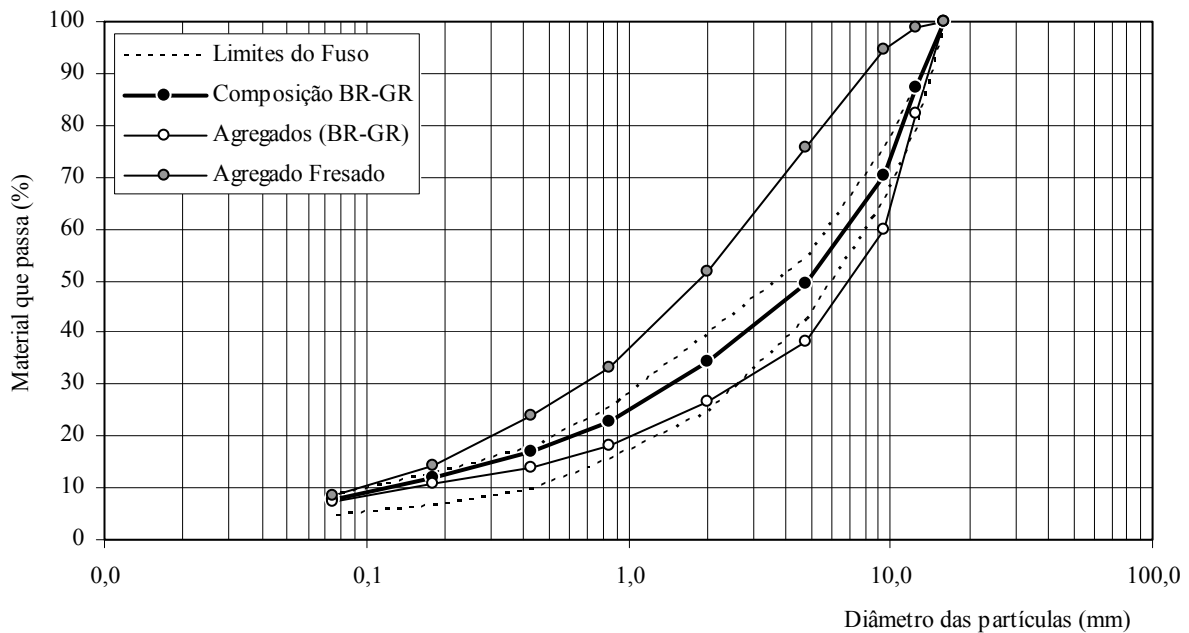


Figura 4.12 – Curvas granulométricas dos constituintes e posicionamento da composição BR-GR no fuso granulométrico

- Estimativa da percentagem de betume

Determinou-se a percentagem de betume aproximada recorrendo à fórmula empírica com base na superfície específica. Fixou-se para o módulo de riqueza em betume o valor habitual para betão betuminoso ($K = 3,0$) e obtiveram-se os resultados resumidos no Quadro 4.18.

Quadro 4.18 – Resultados da fórmula da superfície específica (betão betuminoso)

Parâmetro	BB-FN	BB-GR	BR-FN	BR-GR
ρ_a (g/cm ³)	2,63	2,63	2,63	2,63
F	1,008	1,008	1,008	1,008
S ₁	38,6	45,1	35,5	42,0
S ₂	47,5	42,6	47,8	42,9
S ₃	7,4	6,5	8,5	7,5
P ₂₀₀	6,5	5,9	8,2	7,6
Se	10,9	9,8	13,3	12,3
pb _R (%)	4,9	4,8	5,1	5,0

Além do critério anterior, o MACOPAV indica para o betão betuminoso um teor em betume entre 5,2% e 5,8%, que corresponde a uma percentagem de betume entre 4,9% e 5,5%. Em face dos resultados, escolheu-se 5,0% para a composição BB-FN. No que respeita à composição grossa (BB-GR), por se tratar efectivamente duma composição mais grossa, e que por isso não necessitará de tanto ligante como a fina, seleccionou-se um valor central de 4,5% na formulação *Marshall*. Quanto às misturas recicladas (BR-FN e BR-GR) tomou-se como boa indicação uma percentagem de betume novo intermédia da ordem de $5,0\% \times (1 - TR)$, ou seja 3,5%. Além da percentagem de betume central e como é habitual, consideraram-se, para cada composição, duas abaixo (2,5% e 3,0 %) e duas acima (4,0% e 4,5%).

- Percentagem de betume a usar

Tomando como referência as composições granulométricas calculadas e as percentagens de betume referidas, prepararam-se quatro provetes *Marshall*, por cada uma das cinco percentagens de betume. As curvas obtidas (Figura 4.13 e Figura 4.14) conduziram às percentagens de betume referentes à força de rotura máxima, baridade máxima e porosidade média (5,0%) e respectivo valor médio, resumidos no Quadro 4.19. Refira-se que a porosidade corresponde à média dos limites definidos no CEEP (4% e 6%).

Quadro 4.19 – Resumo das percentagens de betume novo (%) e respectiva percentagem óptima, obtidas pelo método de *Marshall* para as quatro composições estudadas.

Percentagem de betume determinada	BB-FN	BB-GR	BR-FN	BR-GR
Força de rotura máxima	5,3	4,0	3,0	3,5
Baridade máxima	5,5	5,0	4,1	4,1
Porosidade de 5,0%	4,9	5,0	3,3	3,3
Valor médio (percentagem óptima)	5,2	4,7	3,5	3,6

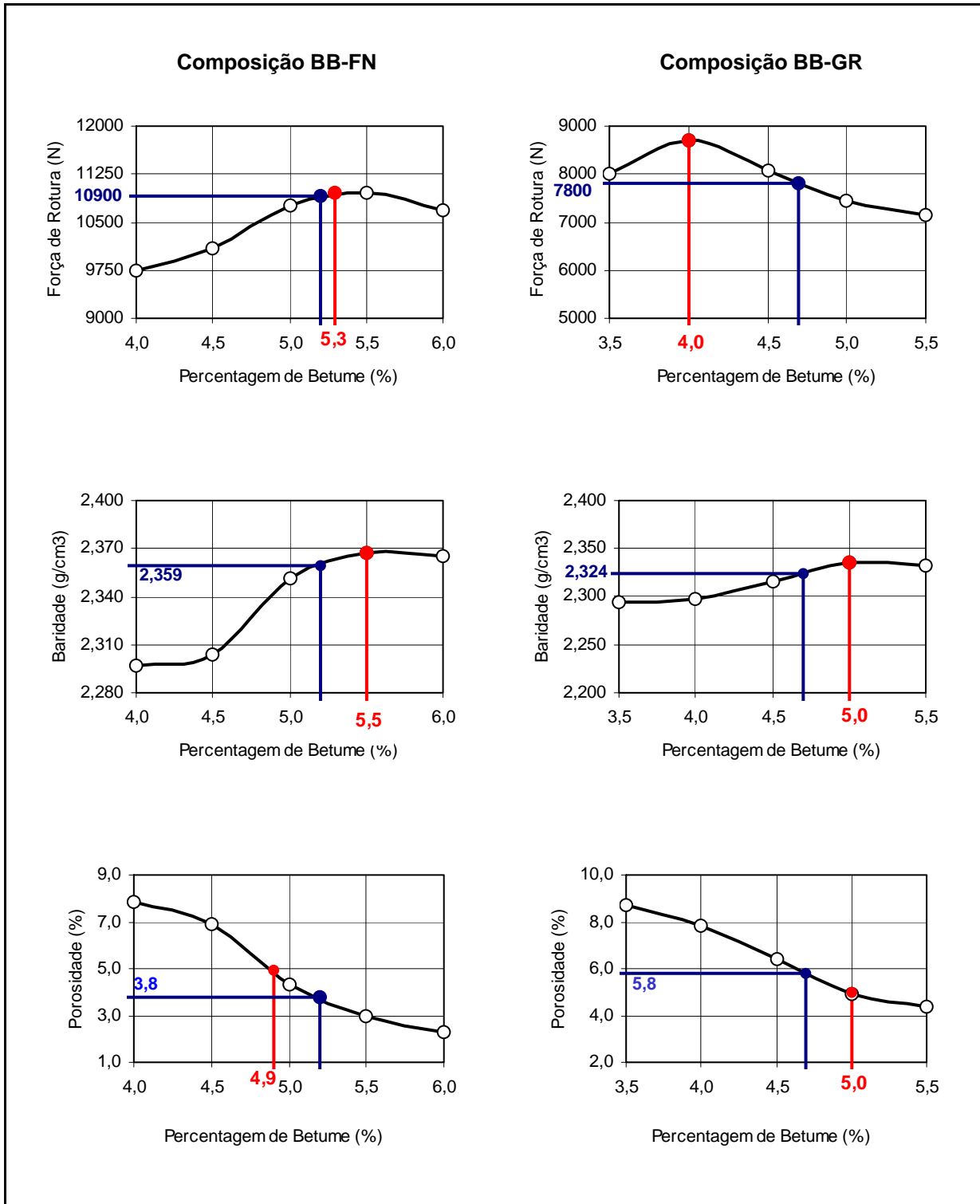


Figura 4.13 – Curvas para estabelecimento da percentagem óptima de betume, obtidas pelo método de *Marshall*, para as composições BB-FN e BB-GR, com indicação dos valores correspondentes à percentagem óptima de betume.

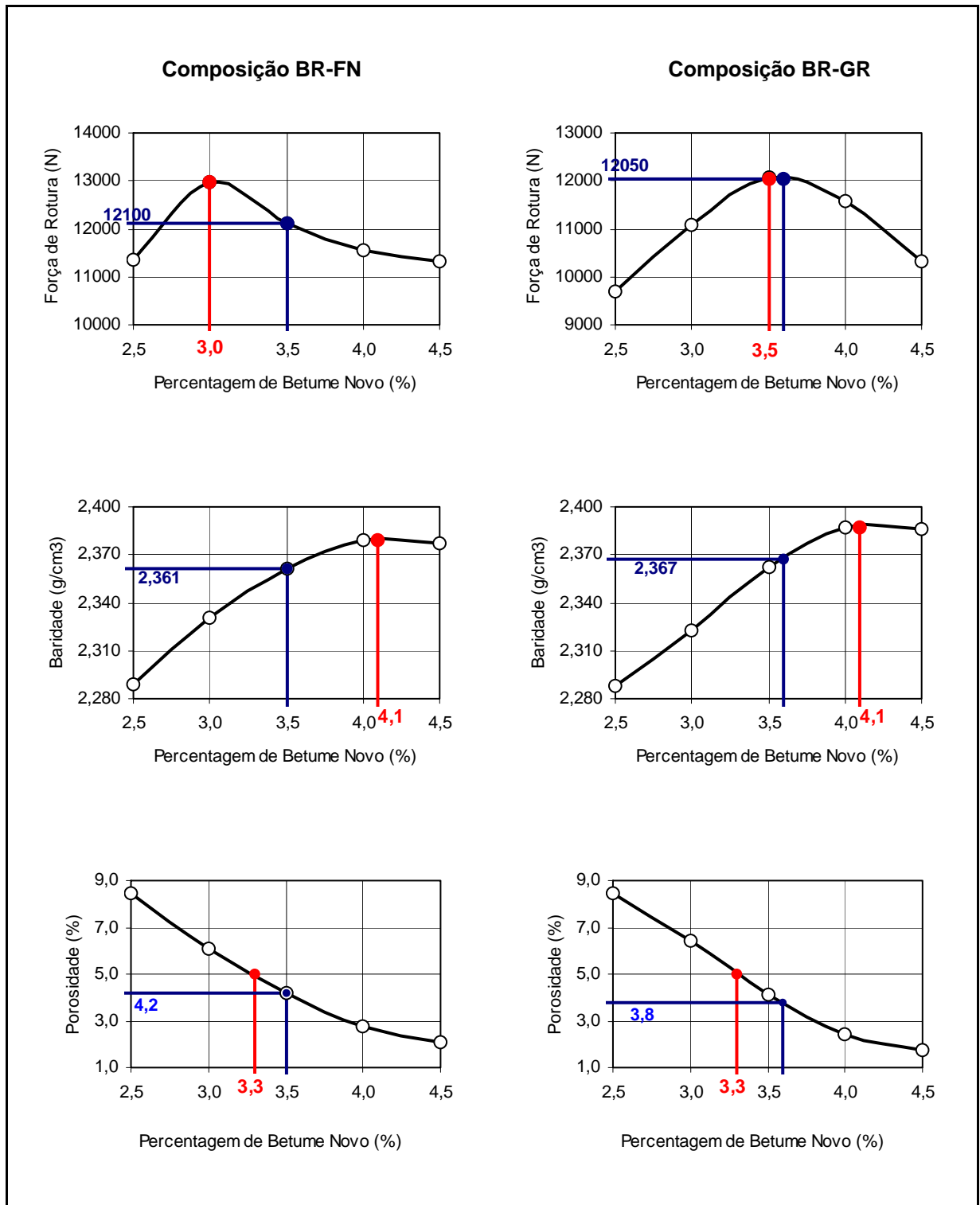


Figura 4.14 – Curvas para estabelecimento da percentagem óptima de betume, obtidas pelo método de *Marshall*, para as composições BR-FN e BR-GR, com indicação dos valores correspondentes à percentagem óptima de betume.

A baridade máxima teórica determinou-se experimentalmente pelo método do picnómetro de vácuo para a percentagem de betume de referência, que aplicando a expressão geral com base nas características físicas dos agregados permitiu estimar a “baridade máxima teórica do material fresado”. Os restantes valores obtiveram-se pela expressão geral de cálculo da baridade máxima teórica.

Determinada a percentagem óptima de betume, obtiveram-se os correspondentes valores de força de rotura, porosidade, VMA e deformação (Figura 4.15 e Figura 4.16), para verificação das condições definidas no CEEP relativas ao betão betuminoso e que se apresentam no Quadro 4.20.

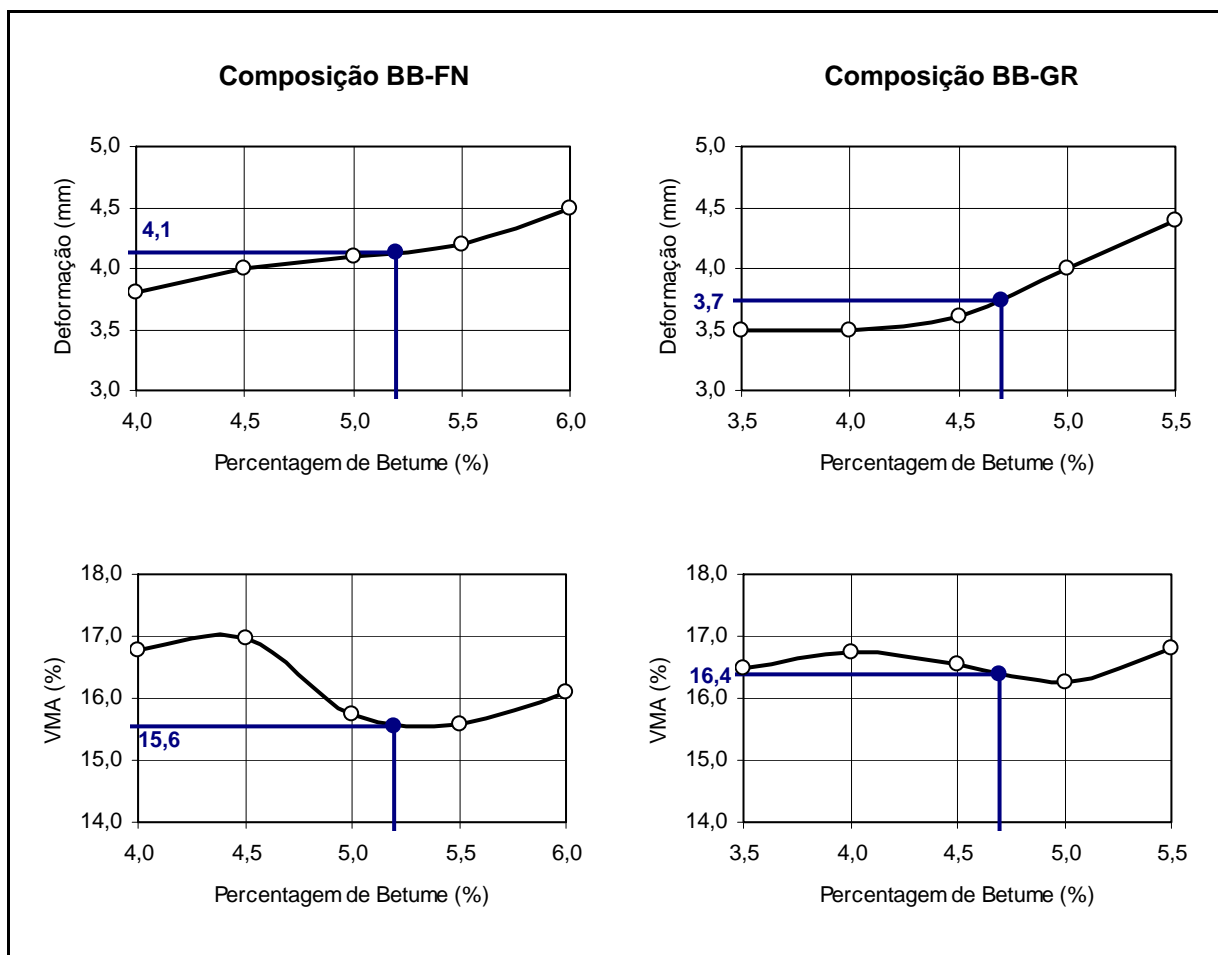


Figura 4.15 – Curvas para determinação da deformação e do VMA, obtidas pelo método de Marshall, com indicação dos valores correspondentes à percentagem óptima de betume, para as composições BB-FN e BB-GR

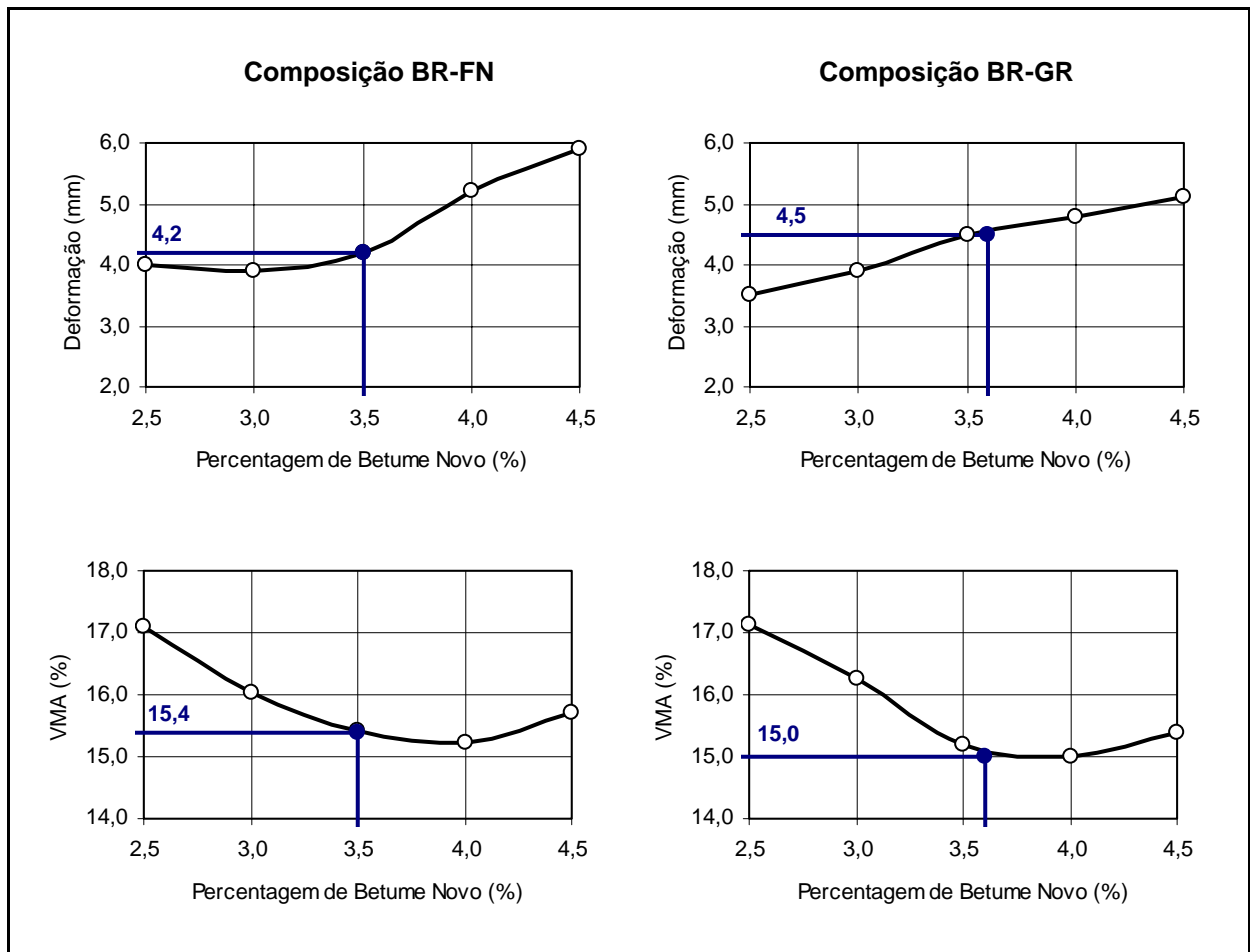


Figura 4.16 – Curvas para determinação dos valores de deformação e do VMA, obtidos pelo método de *Marshall*, com indicação dos valores correspondentes à percentagem óptima de betume, para as composições BR-FN e BR-GR

Quadro 4.20 – Resumo das características das misturas correspondentes à percentagem óptima de betume, para as quatro composições estudadas

Característica	Limites	BB-FN	BB-GR	BR-FN	BR-GR
Força de Rotura	8000 a 15000	10900	7800	12100	12050
Deformação máxima	4 mm	4,1	3,7	4,2	4,5
VMA mínimo	14%	15,6	16,4	15,4	15,0
Porosidade (%)	4% a 6%	3,8	5,8	4,2	3,8
Relação ponderal filer/betume	1,1 a 1,5	1,2	1,2	1,6	1,4
Percentagem óptima de betume novo, pb_N (%)		5,2	4,7	3,5	3,6
Percentagem óptima de betume total, pb_R (%)		5,2	4,7	4,9	5,0

Em face dos resultados (ver Quadro 4.20), começando pelas composições relativas à mistura de referência (sem material fresado), a BB-FN, embora não verifique todos os limites, apresenta uma deformação praticamente igual à máxima e uma porosidade de 3,8%, pouco abaixo do limite mínimo. Já a composição grossa (BB-GR), verifica todas as características

excepto a força de rotura, parâmetro fundamental, em que fica aquém do limite mínimo. No que respeita às composições referentes às misturas recicladas, porque as granulometrias não eram muito diferentes, os resultados são semelhantes nas diferentes características, excepto no caso da deformação em que a composição BR-GR apresenta uma deformação manifestamente mais alta que BR-FN. Assim, optou-se pela composição fina (BB-FN e BR-FN) em ambos os casos.

- Designação das misturas a estudar

Seleccionadas as duas composições de base, optou-se por estudar, em cada caso duas percentagens de betume, a percentagem óptima de betume e outra 0,5% abaixo. Resultaram assim as quatro composições de misturas a estudar (M1, M2, R1 e R2) indicadas no Quadro 4.21, e que serão caracterizadas mecanicamente em ensaios de desempenho.

Quadro 4.21 – Misturas de betão betuminoso produzidas e compactadas em laboratório

Número da Mistura	Designação da Mistura	TR (%)	Betume Novo	pb _R (%)	pb _N (%)
21	M1	0	50/70	–	4,7
22	M2	0	50/70	–	5,2
23	R1	30	50/70	4,4	3,0
24	R2	30	50/70	4,9	3,5

4.4 Execução dos Trechos Experimentais

4.4.1 Nota introdutória

As fórmulas de trabalho determinadas dizem respeito à mistura global, pelo que houve a necessidade de as adaptar tendo em conta o funcionamento da central descontínua disponível para o fabrico das misturas. Nesta secção, depois de adaptadas as “receitas” das misturas, apresenta-se um esquema dos trechos experimentais, descreve-se a central e faz-se um apanhado de alguns aspectos observados aquando do fabrico e aplicação das misturas. Os trabalhos foram realizados no dia 19 de Fevereiro de 2004, em Aveiro, num dos arruamentos do estaleiro da empresa Rosas Construtores, SA.

4.4.2 Adaptação das fórmulas de trabalho

- Alimentação do tambor secador

Estabelecida a composição granulométrica de base e sendo o filer introduzido directamente na unidade de mistura, a partir de silos próprios, foi necessário determinar as proporções dos restantes agregados (pó e britas) nas unidades de alimentação do tambor secador. No Quadro 4.22 indicam-se os respectivos valores aproximados (múltiplos de 2,5%), obtidos a partir dos indicados no Quadro 4.6, depois de normalizados a 100%.

Quadro 4.22 – Fórmulas para alimentação do tambor secador

Agregado	Proporção dos agregados na alimentação do tambor secador (%)			
	TR = 0%	TR = 20%	TR = 30%	TR = 40%
Pó 0/5	45,0	40,0	37,5	35,0
Brita 5/15	25,0	20,0	17,5	15,0
Brita 15/25	30,0	40,0	45,0	50,0

- Unidade de mistura

Finalmente, apresentam-se as fórmulas de trabalho da unidade de mistura, as quais foram estabelecidas tendo em conta as proporções a que se chegou e para uma massa de referência de 1000 kg (procedimento habitual nas centrais de produção de misturas betuminosas). Distribuiu-se a massa total dos agregados novos (britas e pó, excluindo o filer) pelas fracções dos silos aquecidos de armazenamento intermédio existentes na central (0/6 mm, 6/10 mm, 10/15 mm e 15/25 mm), de acordo com as respectivas granulometrias e ainda com as proporções antes determinadas.

Nos Quadros 4.23 a 4.26 indicam-se as fórmulas de trabalho da unidade de mistura, referentes aos quatro trechos. As fórmulas de trabalho estabelecidas, válidas nas condições definidas, foram concretizadas em obra, através da realização dos trechos experimentais.

Quadro 4.23 – Fórmulas de trabalho da unidade de mistura, por 1000 kg (Trecho A)

Componente	Mistura A1	Mistura A2	Mistura A3
Filer	47	47	47
Fracção 0/6	462	460	458
Fracção 6/10	119	118	117
Fracção 10/15	181	180	179
Fracção 15/25	154	153	152
Material fresado	0	0	0
Betume	37	42	47

Quadro 4.24 – Fórmulas de trabalho da unidade de mistura, por 1000 kg (Trecho B)

Componente	Mistura B1	Mistura B2	Mistura B3
Filer	50	50	50
Fracção 0/6	337	335	333
Fracção 6/10	85	84	83
Fracção 10/15	156	155	154
Fracção 15/25	142	141	140
Material fresado	200	200	200
Betume	30	35	40

Quadro 4.25 – Fórmulas de trabalho da unidade de mistura, por 1000 kg (Trecho C)

Componente	Mistura C1	Mistura C2	Mistura C3
Filer	53	53	53
Fracção 0/6	270	268	266
Fracção 6/10	67	66	65
Fracção 10/15	144	143	142
Fracção 15/25	139	138	137
Material fresado	300	300	300
Betume	27	32	37

Quadro 4.26 – Fórmulas de trabalho da unidade de mistura, por 1000 kg (Trecho D)

Componente	Mistura D1	Mistura D2	Mistura D3
Filer	57	57	57
Fracção 0/6	202	200	198
Fracção 6/10	50	49	48
Fracção 10/15	132	131	130
Fracção 15/25	133	132	131
Material fresado	400	400	400
Betume	26	31	36

4.4.3 Esquema dos trechos experimentais

Como se viu na secção anterior, foram definidos quatro trechos, aplicando em cada um três misturas com percentagens de betume diferentes. A espessura prevista para as camadas foi de 10 cm e a largura, a mínima que o equipamento disponível permitia (cerca de 2,5 m). Na Figura 4.17 apresenta-se um esquema da localização relativa dos trechos e da ordem de aplicação das misturas. As misturas do trecho D foram aplicadas em paralelo e as restantes em contínuo.

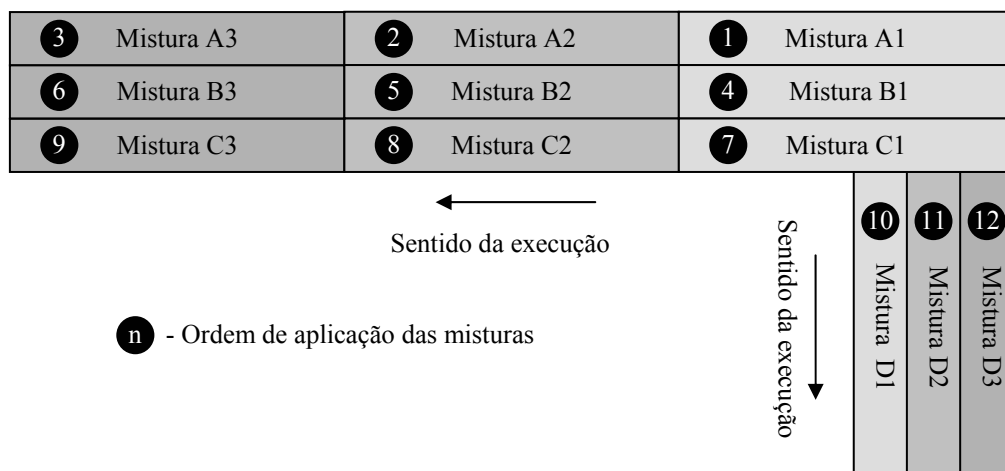


Figura 4.17 – Esquema em planta da localização relativa dos trechos experimentais

4.4.4 Descrição da central usada no fabrico das misturas

A central descontínua, onde foram produzidas as misturas, permite a reciclagem a quente, sendo o material fresado introduzido a frio directamente na unidade de mistura. O seu esquema de funcionamento é idêntico ao apresentado na Figura 4.18.

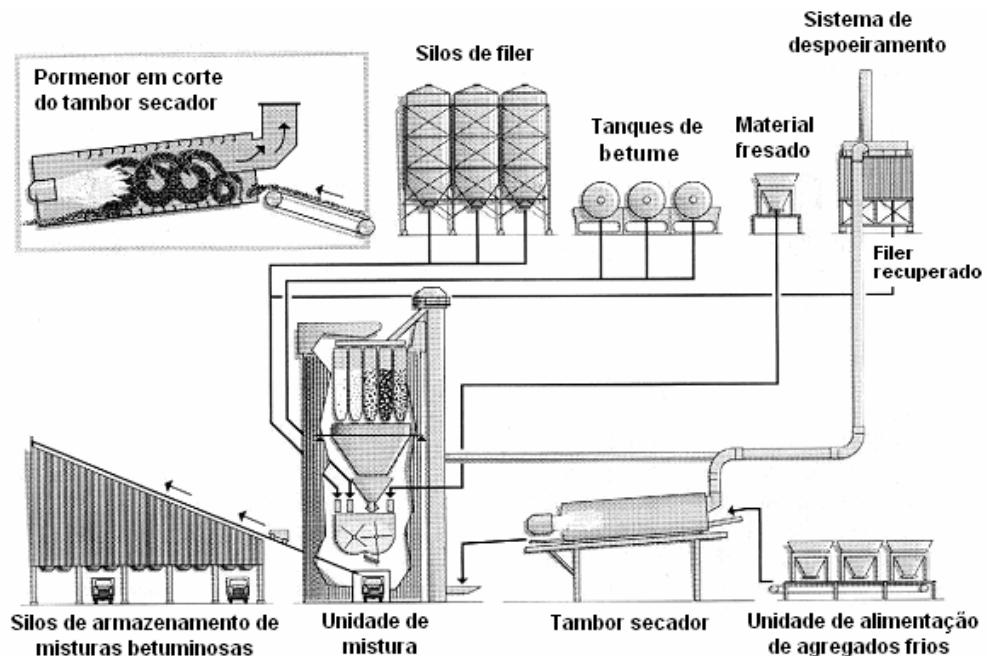


Figura 4.18 – Esquema de central betuminosa descontínua: central de torre (EAPA, 1998)

Neste tipo de central existe um armazenamento intermédio dos agregados aquecidos, assegurado através de silos localizados por cima da unidade de mistura, correspondendo a cada silo uma determinada fracção granulométrica. A central apresenta um funcionamento muito flexível, permitindo, com facilidade, variar o tipo de mistura ou a fórmula de trabalho. Na Figura 4.19 apresentam-se alguns pormenores relativos à rejeição de material de maiores dimensões do material fresado, antes de ser elevado para introdução na unidade de mistura.



Figura 4.19 – Rejeição de material fresado de maior dimensão

4.4.5 Considerações sobre o processo de fabrico

Numa experiência de produção de mistura reciclada a quente, realizada em Setembro de 2003, foram identificadas algumas limitações da central e, em consequência, tomadas algumas precauções, a saber:

- Por segurança, a massa máxima de material fresado, a incorporar por amassadura, não deveria ir além dos 500 kg a 600 kg. Tendo em conta que a unidade de mistura da central apresentava uma capacidade de cerca de 2000 kg por amassadura, a referida limitação traria implicações nas taxas de reciclagem mais altas (30% e 40%). Para solucionar o problema, optou-se por ajustar, em cada caso, a massa total por amassadura em função da TR;
- Sendo o fresado aquecido por condução, a temperatura a que era necessário aquecer os agregados novos seria tanto mais elevada, quanto maior fosse a taxa de reciclagem. Para que tal não representasse uma limitação para as taxas de reciclagem mais altas, além do aumento do tempo de mistura, seria fundamental que se fizesse a mistura “em seco” durante cerca de dez a quinze segundos, e só depois se injectasse o betume (Rubio, 2002). Esta operação permitiu homogeneizar o material a reciclar, eliminar alguma água existente e, não menos importante, baixar a temperatura de aquecimento dos agregados novos.

Tendo em conta o exposto, indicam-se no Quadro 4.27, para as diferentes taxas de reciclagem, os valores adoptados para o tempo de mistura em seco (pré-mistura), o tempo de mistura, a massa total por amassadura e a correspondente massa de fresado. Refira-se que, nesta fase dos trabalhos, a concretização da incorporação de 40% (trecho D), porque poderia estar além do limite da central, foi decidida em função do seu “desempenho” nas taxas abaixo.

Quadro 4.27 – Tempo de pré-mistura (sem betume), tempo de mistura, massa total da amassadura e do fresado, para as misturas dos quatro trechos

Parâmetros de fabrico	Trecho A	Trecho B	Trecho C	Trecho D
Tempo de pré-mistura (s)	0	10	15	20
Tempo de mistura (s)	24	24	24	30
Massa da amassadura (kg)	2000	2000	1500	1500
Massa de material fresado (kg)	0	400	450	600

Fez-se ainda, para cada trecho, uma estimativa da temperatura de aquecimento dos agregados novos (Quadro 4.28), aplicando a expressão (2.17, página 31) e admitindo que não há perdas de calor no processo de mistura. As temperaturas apresentadas, determinaram-se para humidade do material fresado de 1% e 2%, usando os calores específicos referidos no capítulo 3, temperatura do material fresado e do filer de 15°C, temperatura de aquecimento do betume de 155°C, T_a inferior a 275°C e, se possível, temperatura da mistura de 150°C, excepto no trecho A em que se fixou T_a em 170°C.

Quadro 4.28 – Temperatura de aquecimento dos agregados novos e temperatura da mistura betuminosa final, para os quatro trechos e humidade do material fresado de 1% e 2%

Material	<u>Trecho A</u>		<u>Trecho B</u>		<u>Trecho C</u>		<u>Trecho D</u>	
	h = 1%	h = 2%	h = 1%	h = 2%	h = 1%	h = 2%	h = 1%	h = 2%
Mistura betuminosa	160°C	160°C	150°C	150°C	150°C	150°C	140°C	125°C
Agregados novos	170°C	170°C	210°C	220°C	250°C	265°C	275°C	275°C

O controlo da temperatura de aquecimento dos agregados seria fácil de fazer, desde que a central se encontrasse a produzir em contínuo com idêntica TR. Todavia, como se verá, o aumento brusco de T_a (Figura 4.20), principalmente ao passar do trecho A para o trecho B e também do B para o C, conduziu inevitavelmente a uma certa instabilidade na temperatura de aquecimento dos agregados e, em consequência, na temperatura final da mistura.

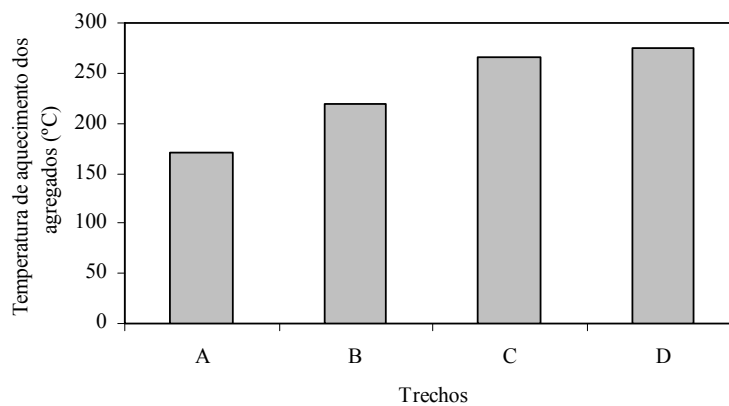


Figura 4.20 – Temperatura de aquecimento dos agregados (2% de humidade do fresado)

4.4.6 Desempenho da central

Durante o fabrico das misturas foi disponibilizado o registo da produção da central. Do Quadro 4.29 ao Quadro 4.32 resumem-se os valores médios das proporções dos diversos componentes, calculados a partir do registo de todas as amassaduras efectuadas na central.

Quadro 4.29 – Desempenho da central: valores previstos nas fórmulas de trabalho (kg), registados na central (kg) e respectivos desvios, para as misturas do trecho A

Componente	<u>Mistura A1</u>			<u>Mistura A2</u>			<u>Mistura A3</u>		
	Previsto	Central	Desvio	Previsto	Central	Desvio	Previsto	Central	Desvio
Fracção 0/6	462	441	-2,1%	460	442	-1,8%	458	447	-1,1%
Fracção 6/10	119	123	+0,4%	118	121	+0,3%	117	119	+0,2%
Fracção 10/15	181	186	+0,5%	180	187	+0,7%	179	182	+0,3%
Fracção 15/25	154	163	+0,9%	153	161	+0,8%	152	159	+0,7%
Material fresado	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Filer	47	47	0,0%	47	45	-0,2%	47	45	-0,2%
Betume	37	39	+0,2%	42	44	+0,2%	47	49	+0,2%

Quadro 4.30 – Desempenho da central: valores previstos nas fórmulas de trabalho (kg), registados na central (kg) e respectivos desvios, para as misturas do trecho B

Componente	<u>Mistura B1</u>			<u>Mistura B2</u>			<u>Mistura B3</u>		
	Previsto	Central	Desvio	Previsto	Central	Desvio	Previsto	Central	Desvio
Fracção 0/6	337	325	-1,2%	335	314	-2,1%	333	313	-2,0%
Fracção 6/10	85	78	-0,7%	84	79	-0,5%	83	72	-1,1%
Fracção 10/15	156	163	+0,7%	155	158	+0,3%	154	152	-0,2%
Fracção 15/25	142	150	+0,8%	141	148	+0,7%	140	141	+0,1%
Material fresado	200	208	+0,8%	200	219	+1,9%	200	235	+3,5%
Filer	50	46	-0,4%	50	46	-0,4%	50	47	-0,3%
Betume	30	32	+0,2%	35	37	+0,2%	40	40	0,0%

Quadro 4.31 – Desempenho da central: valores previstos nas fórmulas de trabalho (kg), registados na central (kg) e respectivos desvios, para as misturas do trecho C

Componente	<u>Mistura C1</u>			<u>Mistura C2</u>			<u>Mistura C3</u>		
	Previsto	Central	Desvio	Previsto	Central	Desvio	Previsto	Central	Desvio
Fracção 0/6	270	242	-2,8%	268	237	-3,1%	266	234	-3,2%
Fracção 6/10	67	68	+0,1%	66	70	+0,4%	65	68	+0,3%
Fracção 10/15	144	147	+0,3%	143	149	+0,6%	142	147	+0,5%
Fracção 15/25	139	145	+0,6%	138	149	+1,1%	137	149	+1,2%
Material fresado	300	319	+1,9%	300	313	+1,3%	300	316	+1,6%
Filer	53	50	-0,3%	53	48	-0,3%	53	46	-0,7%
Betume	27	29	+0,2%	32	35	+0,3%	37	40	+0,3%

Quadro 4.32 – Desempenho da central: valores previstos nas fórmulas de trabalho (kg), registados na central (kg) e respectivos desvios, para as misturas do trecho D

Componente	<u>Mistura D1</u>			<u>Mistura D2</u>			<u>Mistura D3</u>		
	Previsto	Central	Desvio	Previsto	Central	Desvio	Previsto	Central	Desvio
Fracção 0/6	202	182	-2,0%	200	177	-2,3%	198	170	-2,8%
Fracção 6/10	50	52	+0,2%	49	50	+0,1%	48	48	0,0%
Fracção 10/15	132	136	+0,4%	131	136	+0,5%	130	131	+0,1%
Fracção 15/25	133	142	+0,9%	132	142	+1,0%	131	140	+0,9%
Material fresado	400	409	+0,9%	400	413	+1,3%	400	423	+2,3%
Filer	57	51	-0,6%	57	50	-0,7%	57	50	-0,7%
Betume	26	28	+0,2%	31	33	+0,2%	36	38	+0,2%

Observou-se um bom desempenho da central, porquanto os desvios relativamente ao programado se encontram dentro de limites aceitáveis, nomeadamente a percentagem de betume que respeitou a habitual tolerância de 0,3%. Verificou-se, no entanto, um ligeiro desvio, para menos, na parte fina do agregado (filer e fracção 0/6) e uma pequena diferença, para mais, na parte mais grossa do agregado (fracções 6/10, 10/15 e 15/25).

Foi igualmente avaliada a produção da central em toneladas/hora e a sua capacidade, expressa em percentagem da produção média horária observada no fabrico do macadame normal. Como era espectável, a capacidade de produção da central (Figura 4.21) baixou com o aumento da taxa de reciclagem. Convém no entanto chamar à atenção de que os tempos de pré-mistura e de mistura adoptados (ver Quadro 4.27) foram escolhidos com uma certa margem de segurança, pelo que talvez fosse possível chegar a uma melhor capacidade de produção das misturas recicladas.

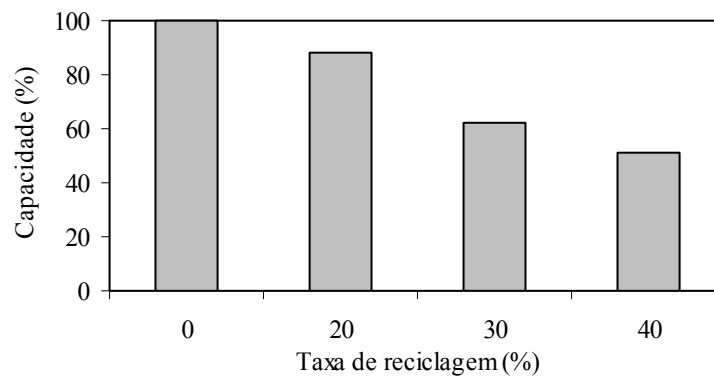


Figura 4.21 – Capacidade de produção no fabrico das misturas aplicadas nos trechos experimentais

4.4.7 Aplicação das misturas

Nesta fase dos trabalhos, entendeu-se que, além da uniformidade das características dos materiais disponíveis, seria indispensável que, dentro do possível, se atingissem temperaturas das misturas uniformes e idênticas condições de compactação. Para isso, efectuou-se o registo da temperatura das misturas à saída da central e na compactação.

No Quadro 4.33 indicam-se as temperaturas médias para cada trecho. Pode dizer-se que a temperatura das misturas do trecho A esteve um pouco acima do desejável e que nas misturas dos trechos C e D, embora baixas, permitiram realizar a compactação. Verificou-se ainda que a temperatura registada na central foi, regra geral, idêntica à registada na compactação, excepto nas misturas com taxa de reciclagem mais alta, em que se registou um aumento devido provavelmente ao maior tempo para o aquecimento se dar por condução.

Quadro 4.33 – Temperaturas médias (°C) dos agregados, do betume e das misturas à saída da central e na aplicação

Material	Trecho A	Trecho B	Trecho C	Trecho D
Agregados	189,9	238,8	239,6	275,6
Betume	156,0	157,0	155,8	154,8
Mistura (central)	168,3	145,0	124,3	108,0
Mistura (compactação)	168,9	144,7	133,3	116,2

Na Figura 4.22 apresenta-se a evolução da temperatura das misturas, dos agregados novos (prevista e observada) e do betume, para as doze misturas. Como se esperava, observou-se alguma instabilidade na temperatura de aquecimento dos agregados.

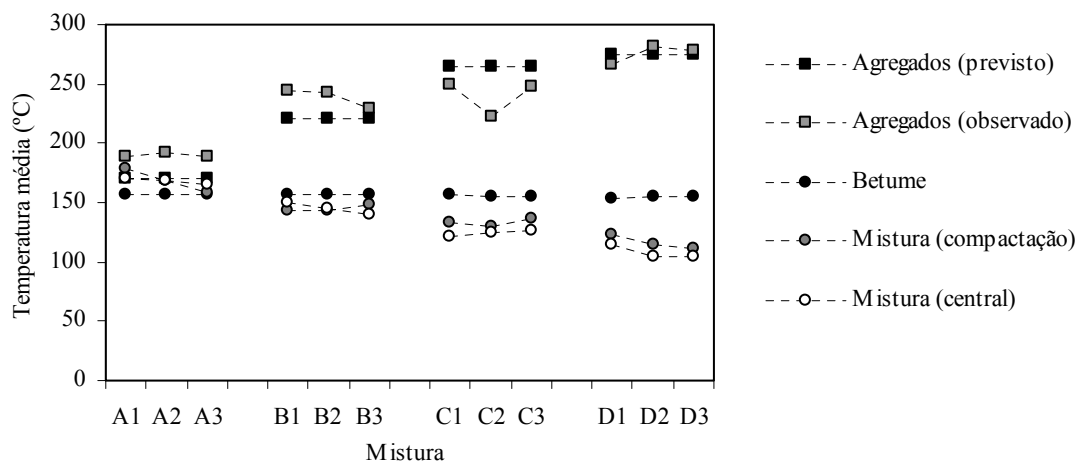


Figura 4.22 – Temperatura dos agregados (prevista e observada), do betume e das misturas, no fabrico e aplicação nos trechos experimentais

Embora se tenha aumentado a temperatura dos agregados com o aumento da taxa de reciclagem, a temperatura das misturas foi baixando com o aumento da proporção de fresado e, em consequência disso, observou-se uma menor trabalhabilidade das misturas recicladas, facto para que as equipas de trabalho já estavam alertadas.

A informação recolhida permitiu verificar a validade das expressões (2.17, página 31) e (2.28, página 33), propostas no Capítulo 2, que permitem estimar a temperatura final da mistura. No Quadro 4.34 indicam-se, para as doze misturas e uma humidade do material fresado de 2%, o parâmetro R (relação entre a massa de material fresado e a massa de agregado), a temperatura de aquecimento dos agregados e ainda os valores previsíveis para a temperatura da mistura – usando as referidas expressões – e os efectivamente observados.

Quadro 4.34 – Parâmetro R e temperatura média (°C) dos agregados, do betume e da mistura

Variável	Trecho A			Trecho B			Trecho C			Trecho D		
	A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2	C3	D1	D2	D3
R	0,000	0,000	0,000	0,291	0,315	0,347	0,531	0,518	0,529	0,867	0,820	0,867
T _a	189,0	192,6	188	244,4	242,3	229,7	249,5	222,2	247,2	266,9	282,3	277,8
T _m (2.17)	178,4	181,5	177,3	166,6	161,7	148,4	136,5	122,8	136,3	113,6	124,3	118,4
T _m (2.28)	189,0	192,6	188,0	178,7	173,0	158,4	146,6	130,3	145,3	121,0	133,8	118,4
T _m	170,0	169,0	166,0	150,0	145,0	140,0	121,0	125,0	127,0	115,0	105,0	104,0

A respectiva representação gráfica (Figura 4.23) vem confirmar que, na central usada e como é normal, existem perdas de calor, porquanto as três rectas de ajuste são quase paralelas e desfasadas de cerca de 11°C, no método geral e de 23°C no método simplificado. Tal significa que, na central usada, pode estimar-se a temperatura de aquecimento dos agregados por (2.29, página 33) desde que se aumente a temperatura desejada para a mistura ($\Delta T_m \approx 23^\circ\text{C}$).

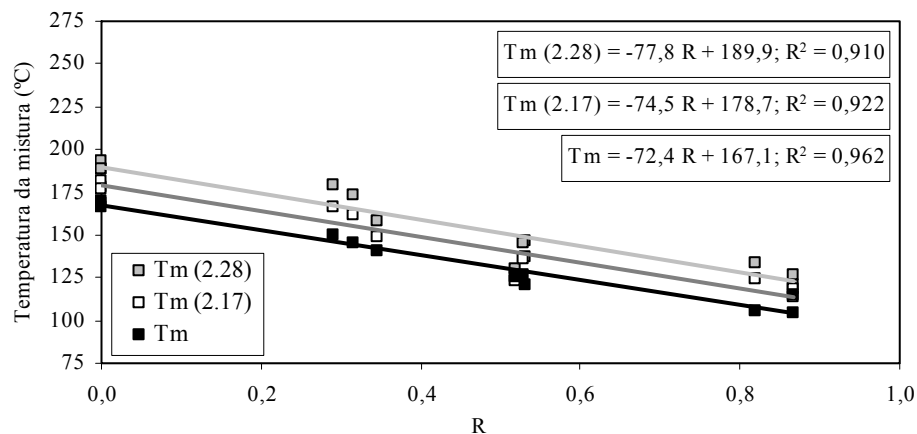


Figura 4.23 – Temperatura final da mistura (prevista e observada)

No que respeita à compactação, admitiu-se que a experiência de colocação em obra por parte do empreiteiro seria suficiente para determinar o número de passagens do trem de compactação. Durante a aplicação das misturas recolheram-se amostras de misturas e quantidades suficientes de betume, agregados e filer para produção das misturas MBLB. Na Figura 4.24 mostram-se algumas fases da aplicação das misturas nos trechos experimentais. Por fim, refira-se que, apesar de estar prevista inicialmente a utilização de betume asfáltico 50/70, foi usado na produção betume 35/50. No entanto, apesar das limitações próprias da reciclagem a quente e do betume usado, os trechos foram executados com sucesso.



Aplicação da rega de impregnação



Espalhamento

Figura 4.24 – Execução dos trechos experimentais



Compacção

Aspecto final dos trechos A, B e C

Figura 4.24 - Execução dos trechos experimentais (continuação)

4.4.8 Espessura das camadas

Após a execução dos trechos experimentais foram extraídos, em cada sub-trecho, quatro tarolos de 100 mm de diâmetro. Tal permitiu verificar a espessura das camadas e dispor, após serragem e rectificação, de provetes para a compressão *Marshall*. As espessuras registadas (Quadro 4.35) encontram-se dentro do esperado, oscilando entre 8,5 e 11,5 cm.

Quadro 4.35 – Espessura (cm) dos tarolos recolhidos dos trechos experimentais

Tarolos	<u>Trecho A</u>			<u>Trecho B</u>			<u>Trecho C</u>			<u>Trecho D</u>		
	A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2	C3	D1	D2	D3
Tarolo n.º 1	8,5	9,0	11,5	10,5	9,5	10,0	9,0	9,5	9,0	8,5	9,5	10,5
Tarolo n.º 2	9,0	9,0	9,5	9,5	9,5	10,0	7,5	9,0	8,5	8,5	9,5	9,5
Tarolo n.º 3	8,5	9,0	9,5	9,0	10,0	9,0	8,5	9,0	10,0	9,0	9,5	9,5
Tarolo n.º 4	8,5	10,0	9,5	9,5	10,5	9,5	9,0	8,5	11,0	9,5	9,5	10,0
Média	8,6	9,3	10,0	9,6	9,9	9,6	8,5	9,0	9,6	8,9	9,5	9,9

4.5 Produção e Compactação das Misturas em Laboratório

No que respeita às misturas de macadame betuminoso, não foi possível reproduzir em laboratório as mesmas condições usadas em central de fabrico das misturas. De facto, em virtude de não se dispor do mesmo poder de envolvimento para a mistura de agregados novos e material fresado, no sentido de aquecer este por condução, foi necessário pré-aquecer o material fresado a uma temperatura da ordem dos 135°C. Resultou por isso uma temperatura inferior de aquecimento dos agregados novos em relação à adoptada em central e misturas provavelmente idênticas às que se obtém em central aquecendo o material fresado.

Os agregados foram aquecidos a 170°C, no caso da mistura de referência (LA), e a 175°C, 180°C e 190°C, nas taxas de reciclagem de 20%, 30% e 40% respectivamente. O betume 35/50, utilizado em laboratório, foi o mesmo dos trechos, razão por que foi aquecido à mesma temperatura usada em central (155°C) aquando da execução dos trechos experimentais. Nos betumes 50/70 e 70/100, fixaram-se temperaturas de 155°C e 150°C respectivamente. As misturas de macadame foram produzidas e compactadas em lajes com espessura da ordem dos 8 cm. Na Figura 4.25 mostram-se as fases de mistura e compactação das misturas em laje.



Figura 4.25 – Aspecto das operações de mistura e compactação em laboratório (lajes)

Também se compactaram em laboratório provetes cilíndricos das misturas MBLB usando um compactador de placa vibratória (Figura 4.26). Os provetes foram compactados durante cerca de 1 minuto em cada face. A compactação dos provetes por este método não garante que os provetes apresentem as faces paralelas pelo que os mesmos foram posteriormente rectificadas.



Figura 4.26 – Aspecto do compactador com placa vibratória

O procedimento laboratorial para o betão betuminoso foi idêntico. O betume foi aquecido a 155°C e o material fresado a 135°C. Nas misturas de referência, M1 e M2, os agregados foram aquecidos a 170°C e nas misturas recicladas (R1 e R2) a 180°C. Neste caso as misturas foram produzidas e compactadas em lajes com espessura da ordem dos 6 cm.

Nos dois tipos de misturas (MBTE e BDLB), foram necessárias três estufas para a produção das misturas recicladas em laboratório. À medida que as amassaduras eram realizadas, guardavam-se na estufa de aquecimento do betume, até que a última amassadura estivesse pronta e assim se pudesse realizar a compactação. Por essa razão, em laboratório a temperatura das misturas na fase de compactação foi igual à temperatura de aquecimento do betume. No Quadro 4.36 indica-se a temperatura dos componentes (agregados, fresado e betume) e da mistura final, referentes às misturas dos trechos experimentais e às misturas de macadame produzidas em laboratório com o mesmo tipo de betume.

Quadro 4.36 - Temperatura dos componentes e da mistura final (misturas dos trechos experimentais e produzidas em laboratório com betume 35/50)

Material	TR = 0%		TR = 20%		TR = 30%		TR = 40%	
	Trecho A	LA	Trecho B	LB	Trecho C	LC	Trecho D	LD
Agregados	189,9	170,0	238,8	175,0	239,6	180,0	275,6	190,0
Fresado	-	-	15,0	135,0	15,0	135,0	15,0	135,0
Betume	156,0	155,0	157,0	155,0	155,0	155,0	154,8	155,0
Mistura	168,9	155,0	144,7	155,0	133,3	155,0	116,2	155,0

4.6 Preparação e Obtenção dos Provetes para os Ensaios de Desempenho

Os ensaios seleccionados, para caracterização mecânica das misturas e as respectivas condições de ensaio, exigiram a preparação e caracterização de um número significativo de provetes para realização dos respectivos ensaios. A seguir faz-se uma descrição das várias fases de preparação dos provetes para os casos em estudo.

4.6.1 Provetes das misturas MBTE

Após a aplicação das misturas nos trechos experimentais, levantaram-se, para cada uma das 12 misturas: seis lajetas de dimensões 40 cm × 40 cm (Figura 4.27) e um “topo” para facilitar a retirada da lajeta. Seguiu-se o corte, com serra circular, em vigas de secção 8 cm × 8 cm, para os ensaios de flexão de cargas repetidas, e em lajes de dimensão 30 cm × 30 cm, para os ensaios com simulador de tráfego.

O corte das lajetas retiradas do pavimento seguiu o esquema indicado na Figura 4.28, dispondo-se assim de três lajes, 12 vigas e de uma lajeta de reserva. Após serragem, as vigas e as lajes foram rectificadas de modo a que as faces superior e inferior ficassem desempenadas e paralelas.

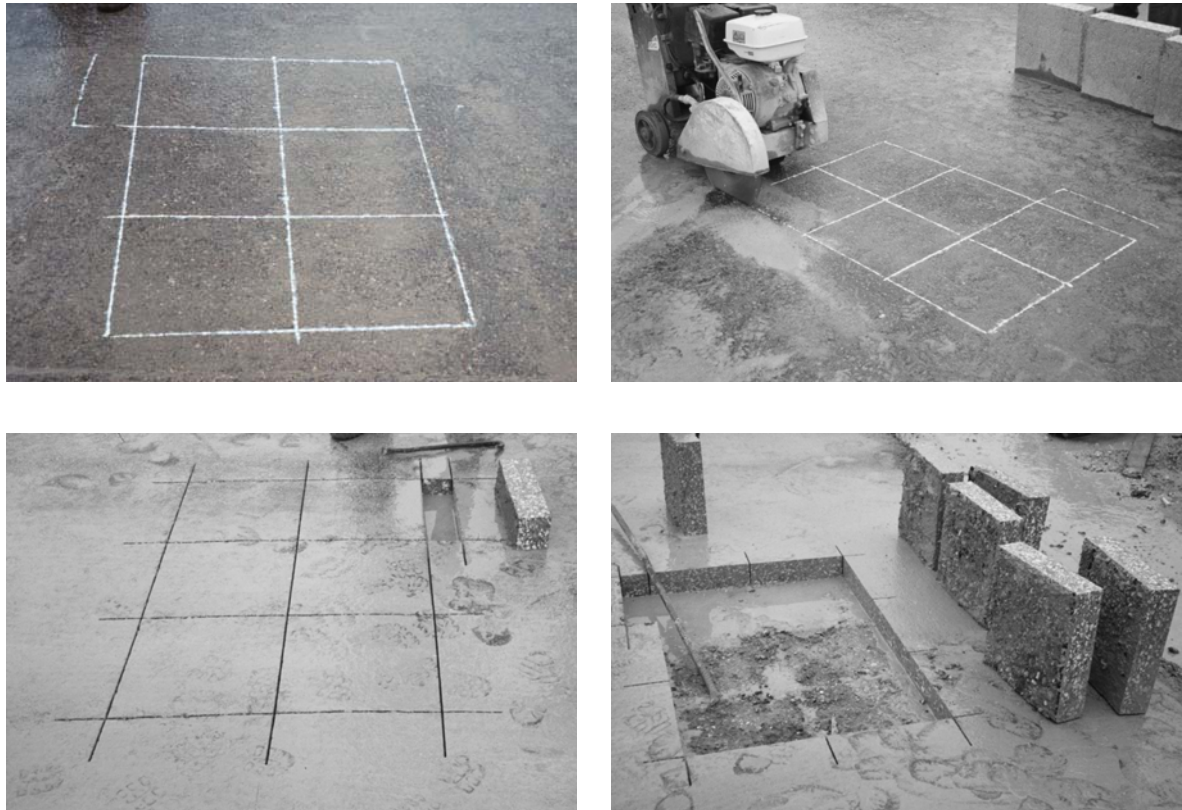


Figura 4.27– Fases do levantamento de lajetas nos trechos experimentais

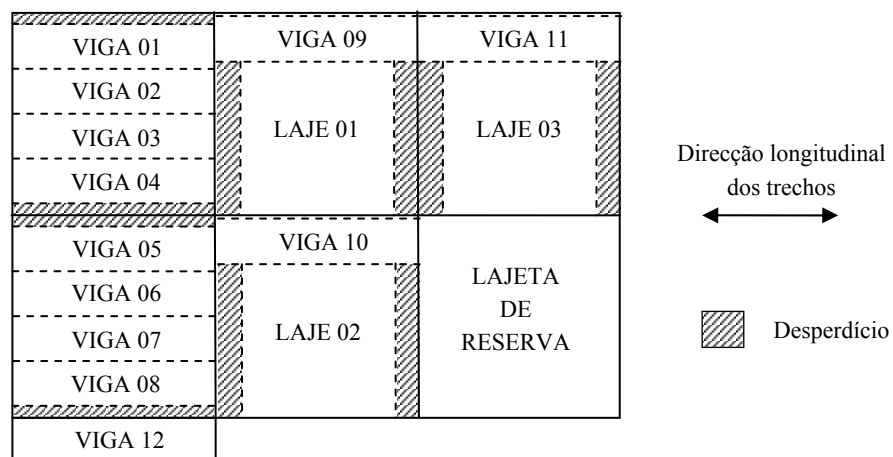


Figura 4.28 – Esquema seguido na serragem das lajetas levantadas nos trechos experimentais

Refira-se que as lajetas retiradas dos trechos apresentavam uma certa irregularidade na parte inferior, que obrigou também a um corte de modo a obter vigas e lajes com espessura da ordem dos 8 cm. Após as operações de serragem, corte e rectificação, ficaram disponíveis 144 vigas e 36 lajes. Na Figura 4.29 mostra-se o aspecto final duma viga da mistura D2 e duma

laje da mistura D3. Fez-se também a extracção de tarolos de 150 mm de diâmetro (Figura 4.30), para os ensaios de compressão de cargas repetidas (uniaxiais e triaxiais). Tal como nos outros provetes (vigas e lajes), foi necessário efectuar um corte na face inferior e proceder à rectificação das duas faces (Figura 4.31).

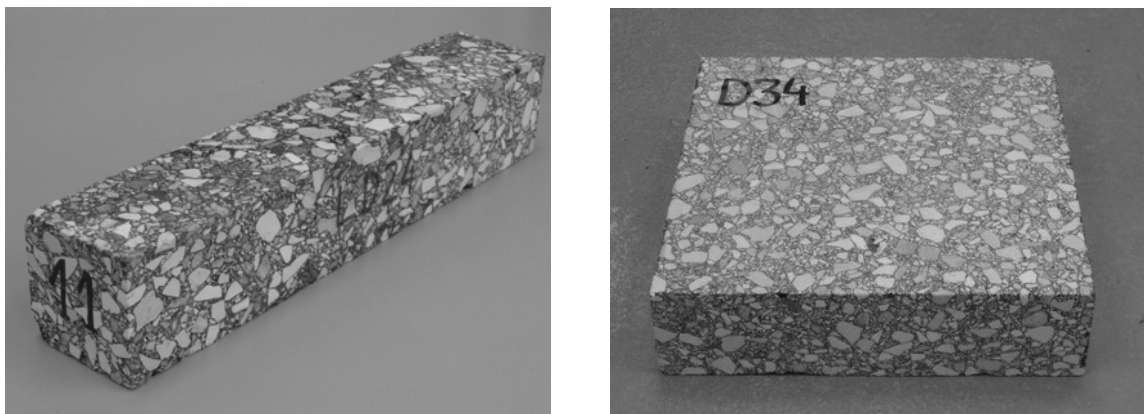


Figura 4.29 – Aspecto de dois provetes (viga e laje) depois de rectificad



Figura 4.30 – Operações de extracção dos tarolos de 150 mm de diâmetro



Figura 4.31 – Operação de corte dos tarolos de 150 mm de diâmetro e exemplo de provete após rectificação

4.6.2 Provetes das misturas MBLB

As lajes compactadas em laboratório, todas destinadas a vigas, ao contrário das dos trechos experimentais, denotam compactação diferenciada nos bordos. Para evitar que os provetes finais apresentassem características volumétricas muito diferenciadas, compactaram-se as lajes em molde de 45 cm de largura e 50 cm de comprimento, de modo a sobrar uma faixa em todo o contorno não inferior a 4 cm.

As vigas obtiveram-se seguindo o esquema da Figura 4.32, ficando, depois de rectificadas, com comprimento não inferior a 40 cm e secção de 8 cm × 8 cm. Foram compactadas três lajes para cada uma das oito misturas MBLB, resultando assim um total de 24 lajes e 96 vigas para os ensaios de desempenho.

4.6.3 Provetes das misturas BDLB

O procedimento seguido para obtenção dos provetes prismáticos (vigas) das misturas BDLB, foi idêntico ao das misturas de macadame (ver Figura 4.32), com a diferença da espessura das lajes ser de 6 cm e de não ser necessário rectificar as vigas. Compactaram-se duas lajes por mistura que deram origem a 10 vigas, ficando assim preparadas 40 vigas para as quatro misturas (Figura 4.33).

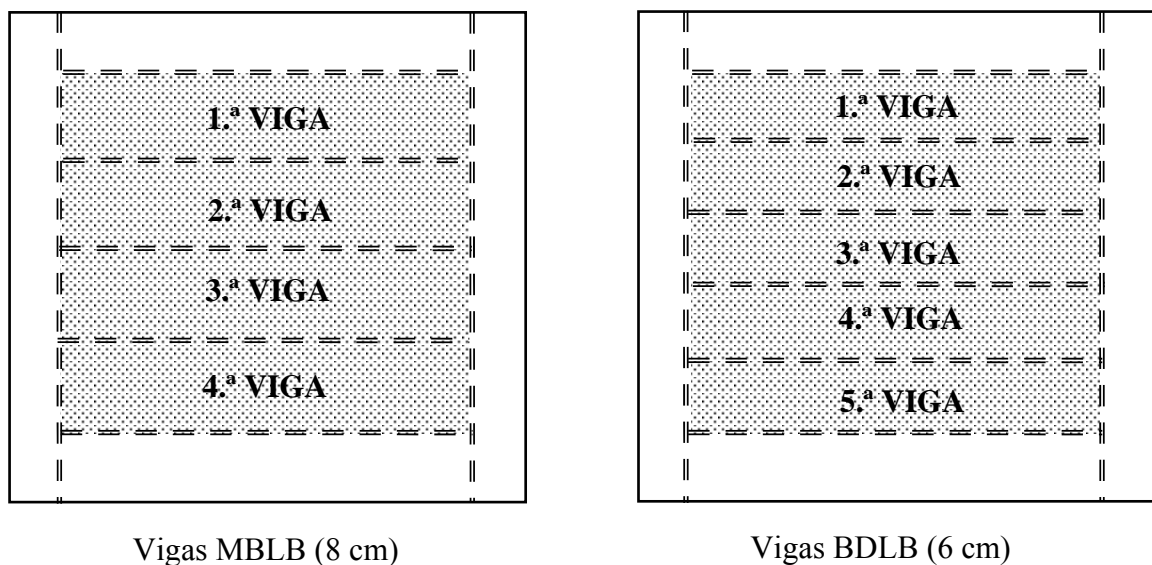


Figura 4.32 – Esquema seguido no corte das lajes compactadas em laboratório, para obtenção das vigas das misturas MBLB e BDLB

Compactou-se ainda uma terceira laje, por cada mistura, que permitiu obter, por carotagem, seis tarolos cilíndricos de 150 mm de diâmetro (Figura 4.34). Como estes tinham espessura reduzida, depois de rectificados, foram colados com emulsão de modo a obter provetes de altura adequada à realização dos ensaios de compressão uniaxial (Figura 4.35).

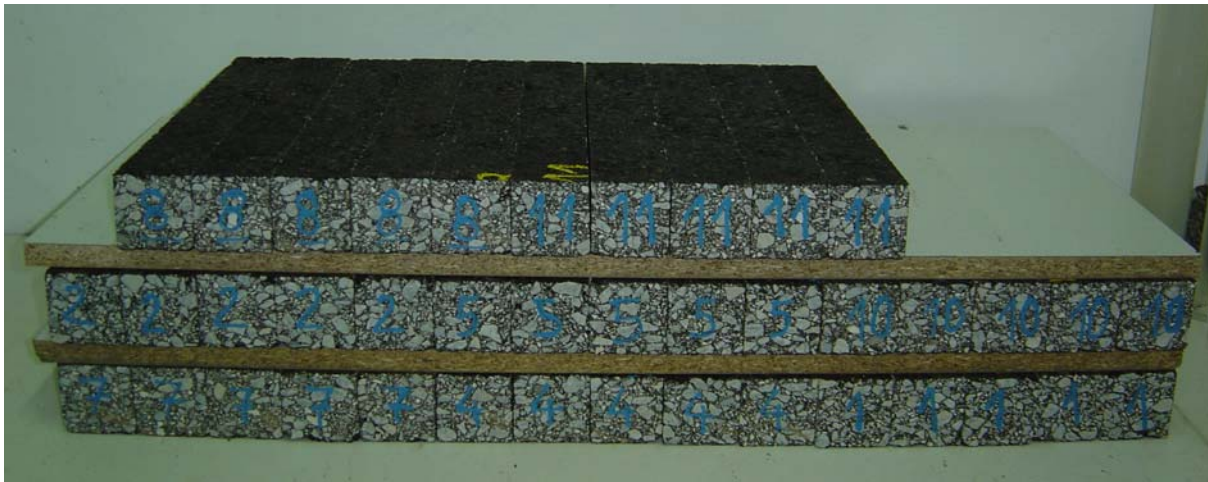


Figura 4.33 – Aspecto das 40 vigas das misturas BDLB

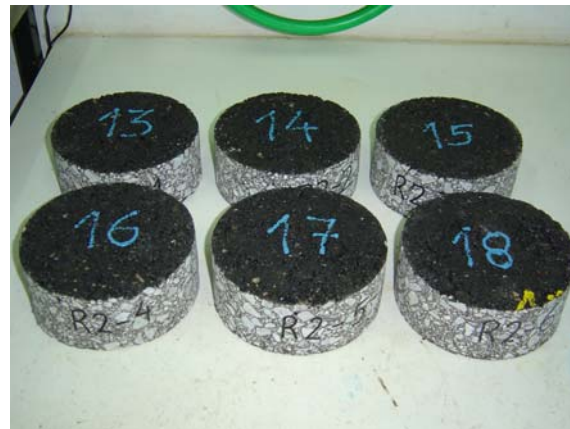


Figura 4.34 – Carotagem das lajes das misturas BDLB e aspecto dos tarolos da mistura R2

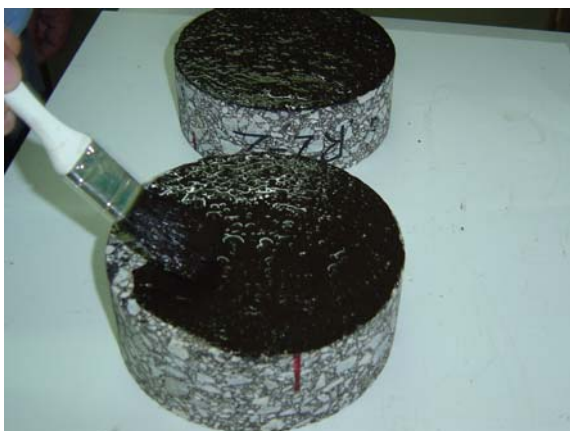


Figura 4.35 – Procedimento de colagem dos provetes das misturas MBLB

4.6.4 Designação dos provetes

Atendendo às diversas origens dos provetes (extraídos do pavimento ou moldados em laboratório) e aos seus diferentes tipos (cilíndricos, lajes ou vigas), entendeu-se definir uma nomenclatura simples para a designação dos provetes a usar nos ensaios de desempenho. Primeiro, indica-se a designação da mistura (24 possíveis), a seguir o tipo de provete (**V** de viga, **C** de cilindro ou **L** de laje) e, por último, indica-se o número de ordem do provete (máximo de 12 em alguns casos). Vejam-se alguns exemplos:

- Provete M1-V02: Viga número **02** da mistura **M1**;
- Provete LF-C10: Cilindro número **10** da mistura **LF**;
- Provete A2-L03: Laje número **03** da mistura **A2**.

4.7 Características Gerais das Misturas

4.7.1 Nota introdutória

Nesta secção faz-se uma síntese das características das misturas aplicadas nos trechos experimentais e das misturas produzidas e compactadas em laboratório. Nas primeiras, porque foram produzidas em central, onde normalmente se observam pequenos desvios relativamente à fórmula de trabalho, verificou-se a sua composição em termos de percentagem de betume, granulometria, estabilidade *Marshall*, baridade e características volumétricas, recorrendo às amostras de misturas recolhidas aquando da execução dos trechos experimentais.

Tal já não se justificou nas segundas, visto que em laboratório a fórmula de trabalho é respeitada. Em ambos os casos, apresentam-se também as características gerais de todos os provetes disponíveis para a realização dos ensaios de desempenho: vigas, lajes e cilindros.

4.7.2 Características das misturas MBTE

- Composição das misturas

O registo da central, embora fiável, constitui um bom indicador da percentagem de betume novo, pelo que, para avaliar a percentagem de betume total foi necessário determinar aquele valor em laboratório, pelo método de incineração (ASTM D6307), sobre as amostras recolhidas durante a execução dos trechos.

No Quadro 4.37 indica-se, para as doze misturas aplicadas, a percentagem de betume (ligante total) prevista, a determinada pelo método de incineração e a estimada a partir do registo da central e da percentagem de betume do material fresado. Os valores obtidos por incineração são idênticos aos previstos, identificando-se apenas dois casos em que o desvio atinge 0,2% (sub-trechos C1 e C2).

Quadro 4.37 – Percentagem de betume (ligante total, em %): prevista, determinada por incineração e estimada a partir do registo da central e da percentagem de betume do fresado

Percentagem de betume	Trecho A			Trecho B			Trecho C			Trecho D		
	A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2	C3	D1	D2	D3
Prevista	3,7	4,2	4,7	3,8	4,3	4,8	3,9	4,4	4,9	4,2	4,7	5,2
Obtida por incineração	3,6	4,1	4,6	3,8	4,4	4,7	4,1	4,6	5,0	4,3	4,7	5,1
A partir do registo da central	3,9	4,4	4,9	4,0	4,5	4,8	4,1	4,7	5,2	4,4	4,9	5,4

Podem indicar-se várias causas para as diferenças encontradas. Em primeiro lugar, como é normal, existe alguma variação na dosagem de betume durante o fabrico. Em segundo, a percentagem de betume do fresado não será certamente uniforme, podendo o seu valor médio, estar acima ou abaixo do considerado. Por último, apenas foi possível realizar uma incineração por sub-trecho, o que poderá ser pouco representativo. Mesmo assim, tomaram-se como referência as percentagens de betume obtidas por incineração.

Após a incineração, procedeu-se à análise granulométrica do agregado, de modo a poder verificar o encaixe no fuso granulométrico. As granulometrias, na generalidade dos casos, cumprem o fuso e apresentam um andamento idêntico ao previsto. Como exemplo, mostra-se na Figura 4.36 a granulometria prevista e a observada no caso das misturas do trecho C.

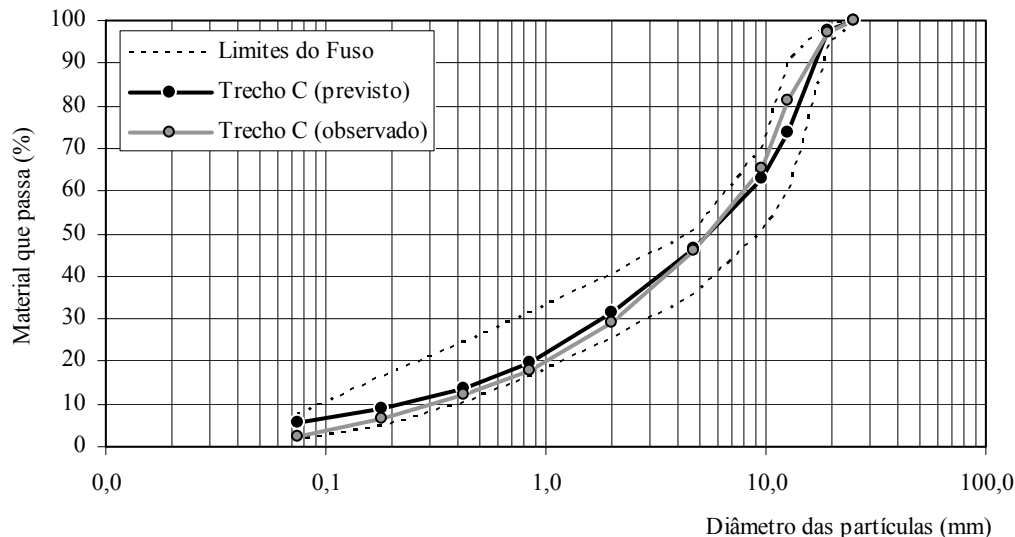


Figura 4.36 – Granulometria prevista e média das misturas do trecho C

- Provetes Marshall provenientes dos trechos experimentais

Selecionaram-se 24 dos tarolos descritos na secção 4.4.8, dois por cada mistura (Figura 4.37), para serem submetidos ao ensaio de compressão *Marshall*. Para isso, os mesmos foram serrados na face inferior de modo a apresentarem uma espessura final da ordem dos 6,3 mm.

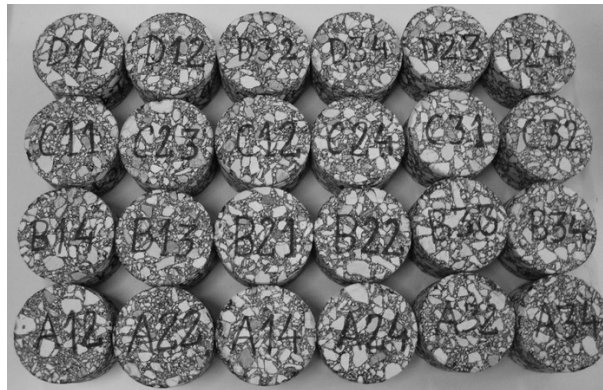


Figura 4.37 – Aspecto dos provetes extraídos dos trechos experimentais, depois de rectificados

- Provetes *Marshall* moldados em laboratório

Foram moldados em laboratório 48 provetes *Marshall*, 4 por cada mistura, com as amostras recolhidas durante a execução dos trechos. Na Figura 4.38 mostram-se os grupos de provetes produzidos para as misturas Ai e Bi.



Provetes (misturas Ai)



Provetes (misturas Bi)

Figura 4.38 – Aspecto dos provetes *Marshall* das misturas MBTE (trecho A e trecho B), moldados em laboratório

Procurou-se que a temperatura na fase de compactação fosse tão próxima quanto possível da temperatura registada durante a compactação em “obra”. No Quadro 4.38 indica-se a temperatura das misturas observada na execução dos trechos e a temperatura adoptada em laboratório.

Quadro 4.38 – Temperatura (°C) das misturas MBTE na fase de compactação nos trechos experimentais e durante a compactação dos provetes *Marshall* em laboratório

Local	Trecho A	Trecho B	Trecho C	Trecho D
Trechos	168,9 °C	144,7 °C	133,3 °C	116,2 °C
Laboratório	165,0 °C	150,0 °C	135,0 °C	125,0 °C

- Baridade das misturas compactadas (provetes *Marshall*)

A baridade dos provetes *Marshall*, provenientes dos trechos e moldados em laboratório, determinou-se de acordo com a norma de ensaio ASTM D 2726-1996. No Quadro 4.39 indica-se o valor médio da baridade. Constata-se que os valores referentes aos provetes extraídos nos trechos são semelhantes, sendo a baridade elevada nos sub-trechos C3 e D3, o que indicia que nestes a porosidade será baixa. A baridade dos provetes moldados em laboratório assume valores mais baixos que a dos provetes dos trechos experimentais.

Quadro 4.39 – Baridade média (g/cm³) dos provetes *Marshall* das misturas MBTE

Provetes	Trecho A			Trecho B			Trecho C			Trecho D		
	A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2	C3	D1	D2	D3
Trechos	2,356	2,373	2,404	2,381	2,413	2,415	2,355	2,413	2,451	2,419	2,397	2,446
Laboratório	2,309	2,343	2,335	2,350	2,367	2,355	2,333	2,353	2,369	2,369	2,366	2,385

- Ensaio de compressão *Marshall*

Determinada a baridade dos provetes, efectuou-se o ensaio de compressão *Marshall* recorrendo ao equipamento da Figura 4.39.



Figura 4.39 – Equipamento para realização do ensaio de compressão *Marshall*

- Baridade máxima teórica

A baridade máxima teórica das misturas foi determinada com o picnómetro de vácuo, tal como é definido na ASTM D 2041 (ASTM, 1995). Para o efeito foram usadas misturas obtidas dos provetes sujeitos a rotura no ensaio de compressão *Marshall*. No caso dos provetes dos trechos, realizou-se um ensaio por cada mistura, e nos de laboratório, duas determinações por trecho, uma na mistura mais rica em betume e outra com menos betume. Neste último caso, estimou-se a baridade máxima teórica para as misturas centrais (A2, B2, C2 e D2). No Quadro 4.40 indicam-se os resultados a que se chegou.

Quadro 4.40 – Baridade máxima teórica (g/cm³) das misturas MBTE

Origem	A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2	C3	D1	D2	D3
Trechos	2,504	2,497	2,493	2,516	2,494	2,475	2,506	2,495	2,486	2,490	2,478	2,467
Laboratório	2,503	2,493	2,487	2,514	2,492	2,473	2,513	2,498	2,486	2,480	2,471	2,462

- Apreciação dos valores relativos aos provetes Marshall

Interessava, nesta fase, proceder a uma verificação das características das misturas, recorrendo aos resultados já descritos e que dizem respeito aos ensaios com os provetes *Marshall* e respectivas misturas. A síntese dos resultados obtidos experimentalmente, apresenta-se nos Quadros 4.41 e 4.42, respectivamente para as misturas dos trechos e de laboratório.

Quadro 4.41 – Resultados relativos aos provetes *Marshall* compactados em laboratório

Mistura	pb (%)	Porosidade (%)	TVB (%)	VMA (%)	Sb (%)	Frotura (N)	Deformação (mm)
A1	3,6	7,8	8,0	15,8	50,7	12283	3,0
A2	4,1	6,0	9,2	15,3	60,6	12280	3,3
A3	4,6	6,1	10,3	16,5	62,8	12675	3,4
B1	3,8	6,5	8,6	15,1	56,8	11553	3,9
B2	4,4	5,0	10,0	15,0	66,6	13398	4,3
B3	4,7	4,8	10,6	15,4	69,1	11008	4,5
C1	4,1	7,2	9,2	16,4	56,3	14790	4,2
C2	4,6	5,8	10,4	16,2	64,3	14155	4,3
C3	5,0	4,7	11,4	16,1	70,8	13463	4,6
D1	4,3	4,5	9,8	14,3	68,7	11160	4,0
D2	4,7	4,2	10,7	14,9	71,6	9618	3,8
D3	5,1	3,1	11,7	14,8	79,0	8380	6,0

Quadro 4.42 – Resultados relativos aos provetes *Marshall* dos trechos experimentais

Mistura	pb (%)	Porosidade (%)	TVB (%)	VMA (%)	Sb (%)	Frotura (N)	Deformação (mm)
A1	3,6	6,1	8,1	14,2	57,2	6550	4,5
A2	4,1	4,5	9,4	13,9	67,8	8500	4,8
A3	4,6	3,0	10,7	13,7	78,3	8950	5,3
B1	3,8	5,5	8,7	14,2	61,3	8550	5,5
B2	4,4	3,3	10,2	13,5	75,6	8750	5,3
B3	4,7	2,3	10,9	13,2	82,9	7200	5,2
C1	4,1	5,3	9,4	14,6	64,0	7600	5,4
C2	4,6	2,8	10,7	13,6	79,0	7950	6,6
C3	5,0	1,3	11,8	13,1	89,7	10800	6,7
D1	4,3	2,9	10,0	12,9	77,9	9250	6,4
D2	4,7	3,5	10,8	14,3	75,6	6700	5,4
D3	5,1	0,7	12,0	12,7	94,7	8050	7,3

Avaliou-se também a sensibilidade das misturas à presença de água, determinando a resistência conservada de provetes Marshall provenientes dos trechos experimentais. No Quadro 4.43 apresentam-se os resultados a que se chegou segundo a Norma Militar Americana MIL-620A e RILEM 17 BM/n.º 3 (APORBET, 1998).

Quadro 4.43 – Resistência conservada (%) das misturas MBTE

A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2	C3	D1	D2	D3
94,5	95,1	100,0	97,4	96,0	100,0	89,4	100,0	90,7	88,3	97,9	99,7

Tomando como referência o especificado no CEEP (JAE, 1998) para macadame betuminoso (Fuso A), seleccionaram-se as seguintes exigências: força de rotura entre 8000 a 15000 N; deformação máxima de 4 mm; VMA mínimo de 13%; porosidade entre 4,0% e 6,0%; resistência conservada mínima de 70%.

Os resultados observados nos provetes moldados em laboratório, regra geral, apresentam valores que respeitam as exigências do CEEP. O intervalo da força de rotura e o valor mínimo do VMA são sempre respeitados. Os limites da porosidade (4% a 6%) não são verificados apenas nas misturas A1, B1, C1 e D3. Já a deformação máxima, respeitada nas misturas de macadame normal (trecho A), por vezes é ultrapassada nas misturas recicladas. Os valores de resistência conservada são muito satisfatórios para todas as misturas, o que indicia pouca sensibilidade à água das misturas recicladas.

As misturas dos provetes dos trechos experimentais, nem sempre verificam o VMA mínimo e a força de rotura e apresentam deformação sempre superior ao máximo e porosidades demasiado baixas, principalmente nos trechos C e D. Tal terá ficado a dever-se, por um lado, à temperatura das misturas que, nas incorporações de 30% e 40%, ficou aquém do desejável e, por outro, à percentagem de betume elevada nos sub-trechos C3 e D3, onde a porosidade registada foi inferior a 2,0%.

Os resultados a que se chegou denotam alguma “desconformidade” das misturas recicladas a quente relativamente às exigências definidas para o macadame betuminoso normal e que se regem pela formulação *Marshall*, pelo que se justifica que a composição das misturas seja estudada e eventualmente validada, com base na realização de ensaios de desempenho, os quais reproduzem de forma mais próxima as solicitações a que as misturas estão sujeitas quando em serviço.

- Provetes usados nos ensaios de desempenho

As características gerais de todos os provetes das misturas disponíveis para os ensaios de desempenho (baridade, porosidade, teor volumétrico em betume, VMA e grau de saturação em betume), podem ser consultadas logo no início do Anexo I. Aqui apresentam-se os valores

médios, por tipo de provete, para todas as misturas MBTE. As misturas dos trechos experimentais (Quadro 4.44) revelam características volumétricas dependentes da percentagem de betume (o que é normal) e da taxa de reciclagem. Existem mesmo algumas misturas com porosidade abaixo de 3,0% (B3, C3, D1 e D3), o que irá certamente afectar o seu comportamento à deformação permanente. Convém referir que, regra geral, as características das misturas MBTE compactadas são idênticas às dos provetes de 100 mm de diâmetro (Quadro 4.42) identificando-se contudo a mistura C2 em que a diferença é razoável.

Quadro 4.44 – Características gerais dos provetes usados nos ensaios de desempenho (misturas MBTE)

Mistura	Provetes	Bt (g/cm ³)	n (%)	TVB (%)	VMA (%)	Sb (%)
A1	Vigas	2,356	5,9	8,2	14,2	58,3
	Cilindros	2,378	5,0	8,2	13,3	62,3
	Lajes	2,350	6,1	8,1	14,3	57,0
A2	Vigas	2,385	4,5	9,5	14,0	68,4
	Cilindros	2,382	4,6	9,4	14,0	67,3
	Lajes	2,388	4,4	9,4	13,8	68,5
A3	Vigas	2,388	4,2	10,7	14,9	71,8
	Cilindros	2,403	3,6	10,6	14,3	74,7
	Lajes	2,395	3,9	10,6	14,5	72,9
B1	Vigas	2,389	5,1	8,8	13,9	63,6
	Cilindros	2,380	5,4	8,7	14,1	61,7
	Lajes	2,390	5,0	8,7	13,8	63,5
B2	Vigas	2,406	3,5	10,3	13,8	74,5
	Cilindros	2,408	3,5	10,2	13,6	74,7
	Lajes	2,397	3,9	10,1	14,0	72,2
B3	Vigas	2,420	2,2	11,0	13,3	83,2
	Cilindros	2,435	1,6	11,0	12,6	87,3
	Lajes	2,422	2,1	10,9	13,1	83,7
C1	Vigas	2,385	4,8	9,5	14,3	66,6
	Cilindros	2,359	5,9	9,3	15,2	61,6
	Lajes	2,375	5,2	9,4	14,6	64,2
C2	Vigas	2,370	5,0	10,6	15,6	68,0
	Cilindros	2,369	5,1	10,5	15,5	67,6
	Lajes	2,398	3,9	10,6	14,5	73,7
C3	Vigas	2,458	1,1	11,9	13,0	91,5
	Cilindros	2,451	1,4	11,8	13,2	89,4
	Lajes	2,456	1,2	11,8	13,0	90,8
D1	Vigas	2,439	2,1	10,2	12,2	83,4
	Cilindros	2,442	1,9	10,1	12,0	84,0
	Lajes	2,429	2,4	10,0	12,5	80,5
D2	Vigas	2,399	3,2	10,9	14,1	77,7
	Cilindros	2,410	2,8	10,9	13,6	80,1
	Lajes	2,400	3,1	10,8	14,0	78,0
D3	Vigas	2,454	0,5	12,2	12,7	95,8
	Cilindros	2,442	1,0	12,0	13,0	92,2
	Lajes	2,453	0,6	12,0	12,6	95,5

4.7.3 Características das misturas MBLB e BDLB

As misturas MBLB, todas com percentagem total de betume fixa (4,2%), revelam características volumétricas muito uniformes (Quadro 4.45), embora um pouco abaixo do desejável, pois existem algumas misturas com porosidade inferior a 3%. As misturas BDLB, de referência e recicladas, apresentam características idênticas, para as duas percentagens de betume (Quadro 4.46).

Como era de esperar, observa-se porosidade mais baixa nas misturas com maior percentagem de betume. As características gerais de todos os provetes, podem ser consultadas no início dos Anexo II e III, respectivamente para as misturas MBLB e BDLB. Determinou-se também a resistência conservada das misturas LA, LB, LC e LD (idênticas às dos trechos experimentais), tendo-se obtido resultados acima de 97% e, por isso, igualmente satisfatórios em termos de sensibilidade das misturas à água.

Quadro 4.45 – Características gerais dos provetes usados nos ensaios de desempenho (misturas MBLB)

Mistura	Provetes	Bt (g/cm ³)	n (%)	TVB (%)	VMA (%)	Sb (%)
LA	Vigas	2,420	3,0	9,9	12,9	76,6
	Cilindros	2,427	2,8	9,9	12,7	78,1
LB	Vigas	2,436	2,6	9,9	12,6	79,1
	Cilindros	2,431	2,8	9,9	12,7	77,8
LC	Vigas	2,416	3,5	9,9	13,4	73,8
	Cilindros	2,429	3,0	9,9	12,9	76,8
LD	Vigas	2,425	2,8	9,9	12,6	78,2
	Cilindros	2,426	2,7	9,9	12,6	78,5
LE	Vigas	2,422	3,3	9,9	13,2	75,0
	Cilindros	2,419	3,4	9,9	13,3	74,4
LF	Vigas	2,411	3,3	9,8	13,1	74,8
	Cilindros	2,410	3,4	9,8	13,2	74,5
LG	Vigas	2,415	3,6	9,8	13,4	73,4
	Cilindros	2,412	3,7	9,8	13,5	72,9
LH	Vigas	2,412	3,3	9,8	13,1	74,9
	Cilindros	2,402	3,7	9,8	13,5	72,7

Quadro 4.46 – Características gerais dos provetes usados nos ensaios de desempenho (misturas BDLB)

Mistura	Provetes	Bt (g/cm ³)	n (%)	TVB (%)	VMA (%)	Sb (%)
M1	Vigas	2,360	4,4	10,8	15,2	71,1
	Cilindros	2,378	3,6	10,9	14,5	74,8
M2	Vigas	2,386	2,7	12,0	14,7	81,8
	Cilindros	2,385	2,8	12,0	14,8	81,4
R1	Vigas	2,376	4,3	10,1	14,4	70,3
	Cilindros	2,376	4,3	10,1	14,4	70,3
R2	Vigas	2,386	3,2	11,4	14,5	78,2
	Cilindros	2,392	2,9	11,4	14,3	79,6

4.8 Ensaios de Desempenho Realizados em Laboratório

Os ensaios de desempenho permitem determinar as características mecânicas das misturas e fazer a respectiva hierarquização mecânica. Nesta secção descrevem-se os equipamentos usados na avaliação das características mecânicas das misturas estudadas e justificam-se as condições de ensaio adoptadas em cada caso.

4.8.1 Ensaios de avaliação do módulo de deformabilidade e do ângulo de fase

A determinação do módulo de deformabilidade, em ensaios de vigas em flexão repetida em quatro pontos (4PB-PR), realizou-se à luz da EN 12697-26 (CEN, 2004-a), na *máquina de ensaios com aplicação de cargas repetidas* (Figura 4.40) do Laboratório de Mecânica de Pavimentos do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra. Uma descrição do equipamento pode ver-se em Capitão (2003).

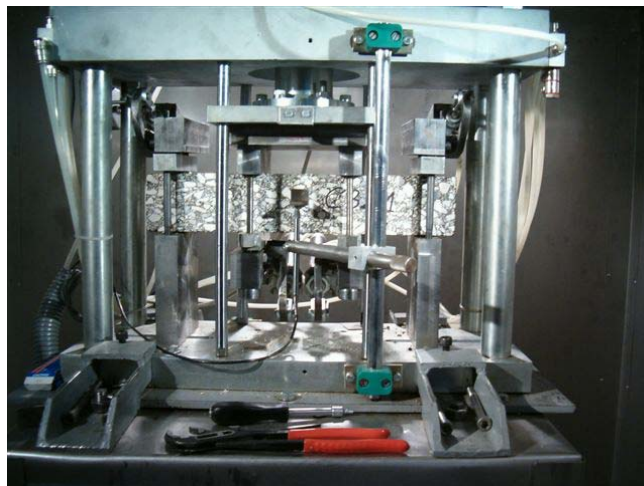


Figura 4.40 – Máquina de ensaios com aplicação de cargas repetidas (FCTUC)

As características de deformabilidade das misturas betuminosas dependem da sua composição e das condições de ensaio em que são determinadas. Importa por isso que as condições de ensaio reflectam as bandas de solicitações a que as camadas betuminosas estão sujeitas, em termos da temperatura, da frequência de carga e do estado de tensão. A análise dos valores medidos nestes ensaios permite avaliar a influência da composição das misturas e das condições de ensaio nas características de deformabilidade das misturas estudadas. No Quadro 4.47 indicam-se as condições de ensaio adoptadas no que respeita à temperatura, à frequência de carga e extensão de tracção imposta.

Quadro 4.47 – Condições de ensaio para avaliação das características de deformabilidade

Grandeza	Valores de ensaio
Temperatura de ensaio	15°C, 25°C e 40°C
Frequência da carga	10 Hz, 5 Hz e 1 Hz
Extensão de tracção	100 microns

O módulo de deformabilidade e o ângulo de fase das misturas dependem, e muito, da temperatura de serviço. Por isso, os valores escolhidos para a temperatura de ensaio devem, dentro do que é razoável, abranger as temperaturas de serviço observadas em Portugal continental em pavimentos rodoviários flexíveis. Para isso, realizaram-se os ensaios a 25°C, temperatura de referência prevista no MACOPAV, a 40°C, temperatura representativa da banda de temperaturas de serviço mais elevadas, e 15°C para a situação oposta.

Neste última, as misturas betuminosas exibem módulo de deformabilidade elevado, o que tomando como referência um processo de dimensionamento considerando acções variáveis, acarreta danos mínimos no pavimento flexível, não interessando por isso ir abaixo de 15°C.

No que respeita à temperatura mais alta, onde a resistência das misturas é reduzida, haveria interesse em atingir temperaturas de ensaio da ordem dos 45°C, valor normalmente adoptado nos ensaios de estudo do comportamento à deformação permanente. Claro está que, se assim fosse, considerar-se-ia uma quarta temperatura intermédia de 35°C. No entanto, a 45 °C observam-se deformações nos provetes no decorrer do ensaio (Capitão, 2003) e que levam à opção de 40°C para temperatura máxima, também representativa das condições mais gravosas.

Como se disse, os ensaios de flexão, com aplicação de cargas repetidas, foram realizados em extensão controlada. Admitiu-se entretanto a possibilidade de impor diferentes níveis de extensão (três por exemplo). Apesar das expressões correntes de previsão do módulo de deformabilidade das misturas betuminosas – como é o caso das expressões da Shell (Claessen *et al.*, 1977) e da Universidade de Nottingham (Powell, 1984) – admitirem que o mesmo é independente do nível de extensão instalado, tal corresponde a uma simplificação. Isto porque as misturas betuminosas exibem um comportamento visco-elástico não linear.

Ora, uma forma de aproximação pode passar por incorporar a extensão de tracção instalada nas expressões de previsão das características de deformabilidade. Por exemplo, Capitão (2003) confirmou, a partir de resultados realizados com três diferentes níveis de extensão (60, 120 e 300 microns), que o módulo de deformabilidade das misturas de alto módulo diminui com o aumento da extensão instalada.

Porém, o número de provetes disponíveis obrigou a que, no caso presente, os ensaios fossem sempre não destrutivos, de modo a reutilizar as vigas nos ensaios de fadiga, estes sim destrutivos. Assim, não sendo possível considerar uma gama de valores mais representativa dos níveis de extensão observados, optou-se por um único nível de extensão de 100 microns.

Finalmente, algumas observações sobre os valores considerados para a frequência de carga. Consultando o ábaco de Van der Pool (Van der Poel, 1954), determinaram-se os pares de

valores frequência (f), em Hz, e o tempo de carregamento (t_c), em segundos, indicados no Quadro 4.48, onde se incluem também os correspondentes valores da velocidade média da corrente de tráfego (V), expressa em km/h, que se relaciona com o tempo de carregamento pela expressão (4.1) proposta pela Universidade de Nottingham (1986).

$$t_c = \frac{1}{V} \quad (4.1)$$

Quadro 4.48 – Conjuntos de valores de frequência e correspondentes tempos de carregamento e da velocidade média da corrente de tráfego

Frequência (Hz)	Tempo de carregamento (s)	Velocidade da corrente de tráfego (km/h)
10,0	0,015	66,7
5,0	0,030	33,3
1,0	0,150	6,7
0,1	1,500	0,7

A representação gráfica dos valores das três grandezas (Figura 4.41) permite chegar às equações (4.2) e (4.3), que relacionam a frequência com o tempo de carregamento e com a velocidade média da corrente de tráfego.

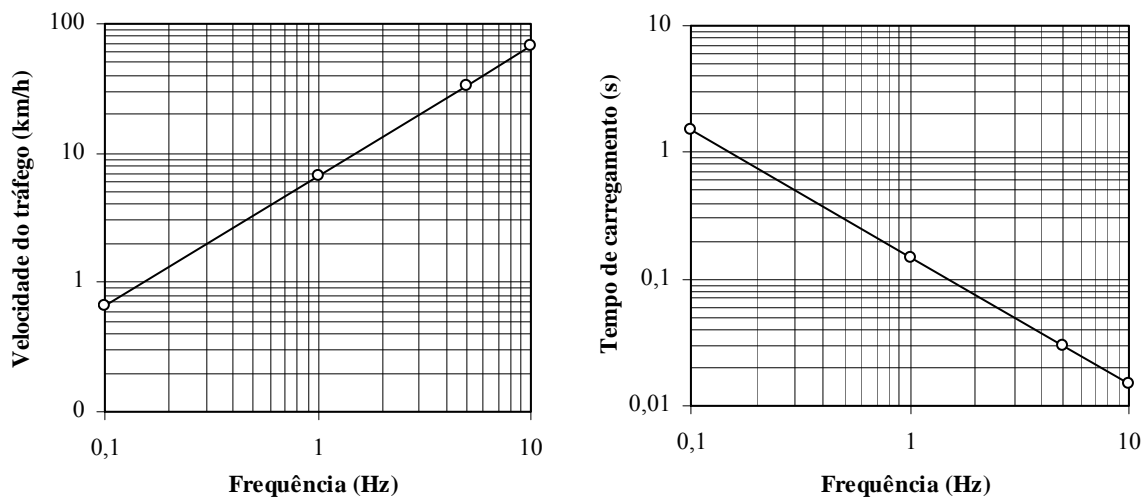


Figura 4.41 – Representação da relação entre a frequência de ensaio e a velocidade média da corrente de tráfego e o tempo de carregamento

$$V = \frac{f}{0,15} \quad (4.2)$$

$$t_c = \frac{0,15}{f} \quad (4.3)$$

Perante os valores encontrados, concluiu-se que as frequências usadas nos ensaios (10 Hz, 5 Hz e 1 Hz) representam bem os valores de velocidade média da corrente de tráfego habitualmente usados no dimensionamento de pavimentos rodoviários flexíveis. Refira-se ainda que, nos ensaios de avaliação do módulo de deformabilidade, se fez um varrimento de frequências, da mais alta para a mais baixa.

Como se trata de ensaiar um material compósito (misturas betuminosas) com resistência variável ao longo das aplicações de carga, a aplicação de uma extensão fixa fica dificultada, pelo que, por vezes, não houve um ajuste pleno às condições de ensaio, tendo-se registado, na frequência mais alta (10 Hz), ligeiros desvios na extensão relativamente ao pretendido. Na Figura 4.42 mostra-se a evolução da extensão observada ao longo de 100 ciclos, a 10 Hz e temperaturas de 15°C, 25°C e 40°C, sobre vigas das misturas D1 e R1. As Figuras 4.43 e 4.44, mostram a correspondente evolução do módulo de deformabilidade e do ângulo de fase.

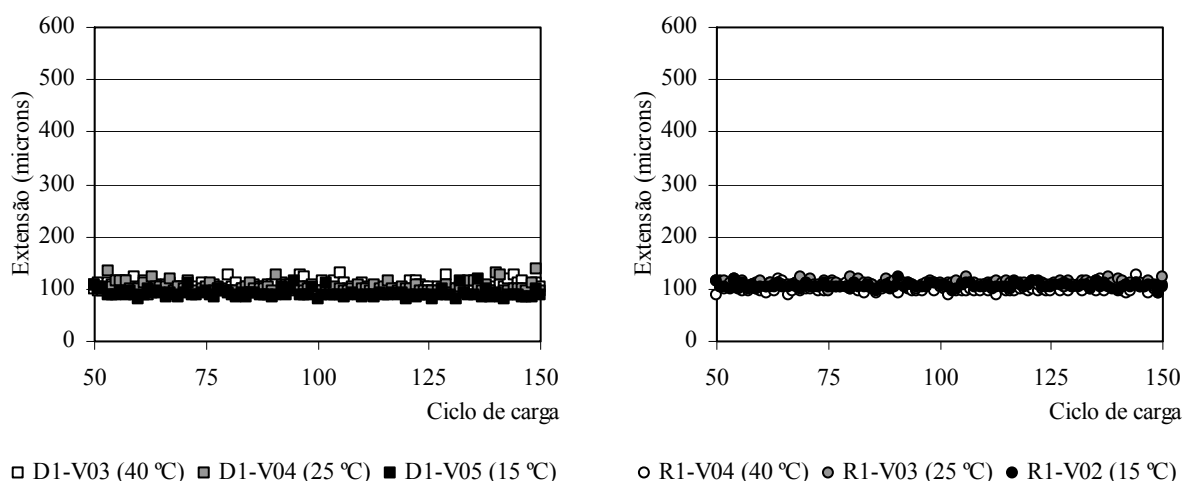


Figura 4.42 – Exemplos de evolução da extensão em ensaio de flexão de cargas repetidas realizado a 10 Hz (misturas D1 e R1)

4.8.2 Ensaios de avaliação da resistência à fadiga

Para avaliação da resistência à fadiga, tomou-se como referência a EN 12697-26 (CEN, 2004-b) e efectuaram-se ensaios de cargas repetidas do tipo 4PB-PR, idênticos aos realizados para medir as características de deformabilidade. Na generalidade dos ensaios adoptou-se um número de três ensaios como suficientemente representativo para caracterizar o material. Realizaram-se então nove ensaios destrutivos para cada uma das misturas ensaiadas, existindo entretanto situações em que, por razões de vária ordem, não se dispôs dos resultados de nove ensaios.

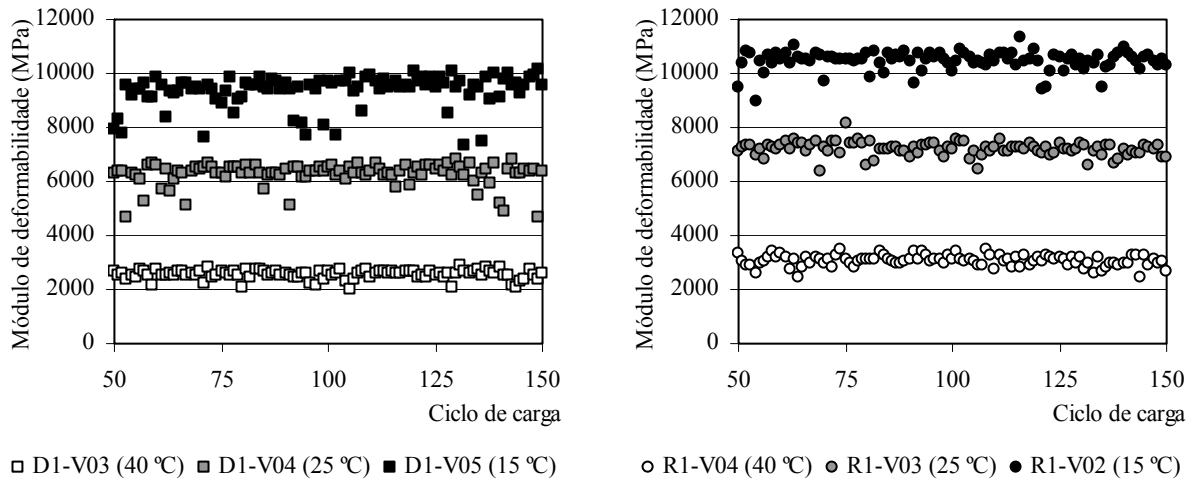


Figura 4.43 – Exemplos de evolução do módulo de deformabilidade em ensaio de flexão de cargas repetidas realizado a 10 Hz (misturas D1 e R1)

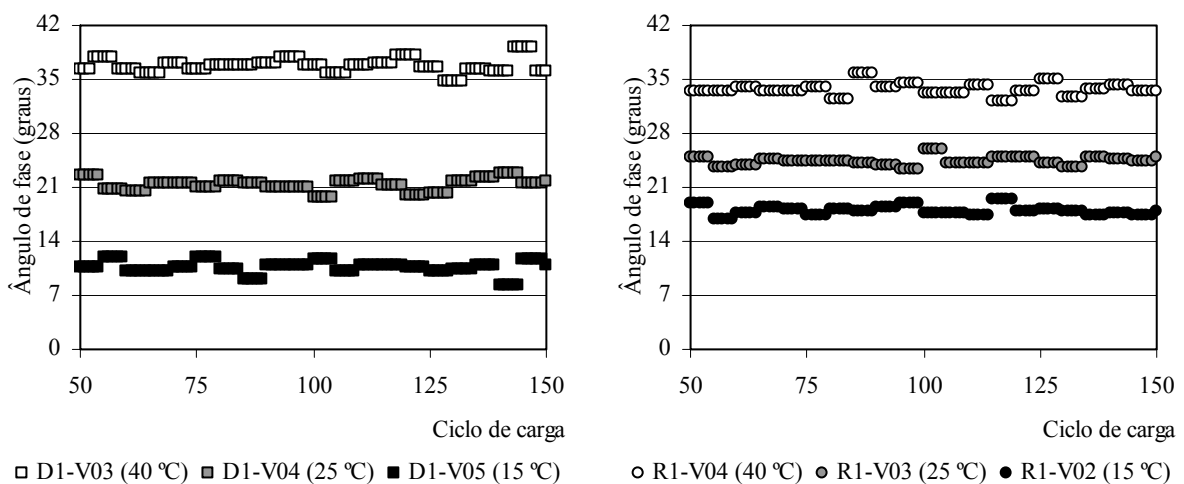


Figura 4.44 – Exemplos de evolução do ângulo de fase, em ensaio de flexão de cargas repetidas realizado a 10 Hz (misturas D1 e R1)

No que concerne à temperatura de ensaio, adoptou-se a temperatura de 25°C, a qual é uma temperatura representativa das condições médias de serviço em Portugal Continental (Picado-Santos, 1995). Quanto ao carregamento, de forma sinusoidal, impôs-se uma frequência única de 10 Hz, a qual, como se viu, corresponde a um tempo de carregamento da ordem dos 0,015 s e a uma velocidade média da corrente de tráfego da ordem dos 67 km/h, portanto muito próxima de 50 km/h e 60 km/h, valores usadas correntemente no dimensionamento empírico-mecanicista de pavimentos rodoviários flexíveis.

Procurou-se que os três níveis de extensão controlada fossem suficientemente representativos dos valores usados em dimensionamento. Todavia, em algumas misturas, verificou-se que um

nível de extensão baixo (da ordem dos 200 microns) conduzia a uma duração de ensaio demasiado longa (dois ou mais dias).

A estratégia passou então por realizar, para cada material, um primeiro ensaio a um nível de extensão da ordem dos 350 a 400 microns e, a partir da duração desse ensaio, escolher níveis de extensão ajustados à maior ou menor resistência à fadiga do material: o nível mais baixo correspondente a uma duração máxima da ordem dos 10^6 ciclos de carga, o mais alto a uma duração da ordem dos 10^4 ciclos e o intermédio a uma duração da ordem dos 10^5 ciclos.

No Quadro 4.49 indicam-se os níveis de extensão tomados como referência, para os diferentes grupos de misturas estudadas, tendo-se fixado, em cada grupo/nível de extensão, diferenças de mais ou menos 50 microns.

Quadro 4.49 – Resumo dos níveis de extensão considerados nos ensaios de fadiga

Tipo de mistura	Níveis de extensão de referência (microns)		
	Extensão baixa	Extensão média	Extensão alta
MBTE	250 +/- 50	400 +/- 50	550 +/- 50
MBLB	300 +/- 50	450 +/- 50	600 +/- 50
BDLB	400 +/- 50	550 +/- 50	700 +/- 50

Impôs-se como critério de paragem uma redução de 50% no valor do módulo de deformabilidade da mistura. A título de exemplo, na Figura 4.45 observa-se a evolução do módulo de deformabilidade ao longo de ensaio de fadiga, realizado para uma extensão controlada de 550 microns (provete D1-V04). Na Figura 4.46 apresenta-se a variação do ângulo de fase ao longo do mesmo ensaio e a respectiva evolução da energia dissipada acumulada com o número de ciclos de carga na Figura 4.47.

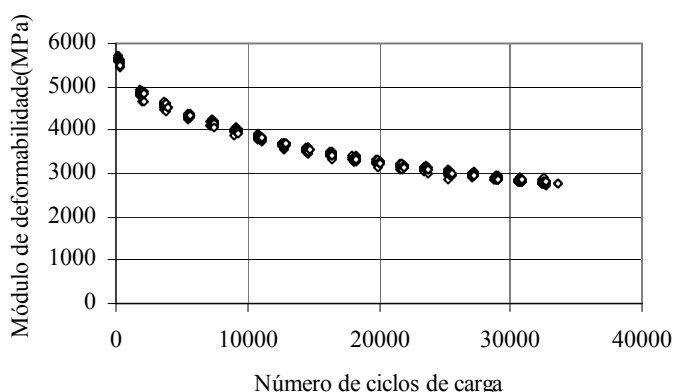


Figura 4.45 – Exemplo de evolução do módulo de deformabilidade (provete D1-V04)

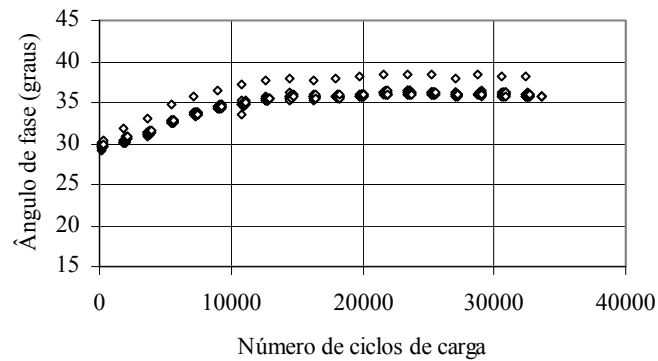


Figura 4.46 – Exemplo de evolução do ângulo de fase (provete D1-V04)

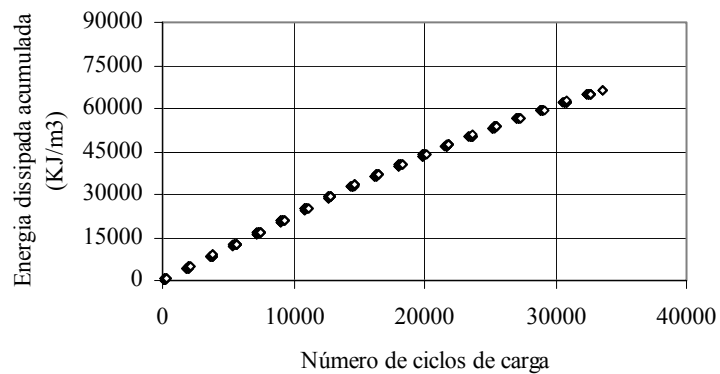


Figura 4.47 – Exemplo de evolução da energia dissipada acumulada (provete D1-V04)

Ao contrário dos ensaios de avaliação do módulo de deformabilidade, que são rápidos e com aquisição contínua, os ensaios de fadiga, por serem longos conduziriam a ficheiros de resultados de tamanho inoportável não sendo assim possível proceder a uma aquisição contínua dos resultados. Por essa razão, definiu-se uma aquisição periódica, com fases de não aquisição tanto mais longas quanto menor o nível de extensão do ensaio (Quadro 4.50).

Quadro 4.50 – Parâmetros de aquisição de resultados nos ensaios de fadiga

Parâmetro	Extensão baixa	Extensão média	Extensão alta
Frequência aquisição (Hz)	100	100	100
N.º de ciclos de aquisição	300	300	300
N.º de ciclos de não aquisição	17700	5700	1500
Proporção de aquisição	1/3	1/10	1/30

4.8.3 Ensaio de avaliação da resistência à deformação permanente

O estudo da resistência à deformação permanente foi feito a partir dos resultados de ensaios de compressão uniaxial de cargas repetidas sobre provetes cilíndricos de 150 mm de diâmetro, de ensaios com simulador de tráfego (*Well Tracking*) sobre lajes de $30 \times 30 \times 8 \text{ cm}^3$ e ainda recorrendo a ensaios triaxiais. Estes dois últimos realizaram-se apenas com misturas dos trechos experimentais.

É habitual realizar estes ensaios de desempenho a temperaturas que variam entre 40°C a 60°C. Nas camadas betuminosas, a temperatura de serviço atinge valores elevados nos meses de Verão, pelo que algumas normas estrangeiras indicam 60°C para a temperatura de ensaio (DGC, 1984 e BSI, 1998). Porém, este valor não pode ser considerado representativo da situação portuguesa, mesmo nas zonas mais quentes de Portugal Continental onde só faria sentido querendo representar a exceção já que a sua probabilidade de ocorrência, mesmo a 2,5 cm de profundidade, é inferior a 1% (Freire, 2002 e Capitão, 2003).

Refira-se ainda que, muito do que se vai expor nesta secção, segue de perto uma avaliação sobre esta matéria feita por Gardete (2005). Adoptou-se a temperatura de 45°C em todos os ensaios de avaliação da resistência à deformação permanente, pelas seguintes razões:

- Como se viu no Capítulo 3, trata-se de uma temperatura representativa da gama de temperaturas para a zona média de Portugal Continental (Freire, 2002), que confere à mistura um comportamento mais rígido do que utilizando temperaturas superiores, e que favorece a avaliação da sensibilidade dos ensaios;
- A utilização de temperaturas mais elevadas não se justificava pois esta mistura é utilizada em camadas de regularização ou, no caso do betão betuminoso, em camada subjacente, pelo que não estão sujeitas a temperaturas extremas como as camadas de desgaste;
- Considerou-se importante que a temperatura utilizada se situasse abaixo da temperatura de amolecimento pelo método do anel e bola dos betumes utilizados, o que permite que o betume apresente uma parcela de resistência à deformação permanente, como acontece na esmagadora maioria das situações.

- Ensaio de compressão uniaxial de cargas repetidas

Os ensaios de compressão uniaxial de cargas repetidas realizaram-se na *máquina de ensaios com aplicação de cargas repetidas*, desenvolvida no DEC-FCTUC, a mesma usada para executar os ensaios de flexão com vista à avaliação das características de deformabilidade e de resistência à fadiga. Os ensaios desenrolaram-se de acordo com a EN 12697-25, *Bituminous mixtures - Test Methods for Hot Mix Asphalt – Part 25: Cyclic Compression test*, (CEN, 2005). Segundo a norma, embora o carregamento seja uniaxial, consegue-se algum

grau de confinamento pelo facto de o diâmetro da placa de carga ser inferior ao diâmetro do provete.

Os provetes cilíndricos de 150 mm de diâmetro, provenientes dos trechos experimentais (misturas MBTE) e os das misturas MBLB, apresentavam alturas da ordem dos 10 cm. No entanto, estas dimensões correspondem a uma relação altura/diâmetro em que se pode observar o chamado efeito fronteira, caracterizado pela ocorrência de tensões tangenciais de atrito entre o provete e as placas de carregamento, que acabam por gerar um estado de tensão não uniforme no provete (Gardete, 2005).

Para minorar este efeito, no ensaio de compressão uniaxial de cargas repetidas lubrificaram-se as placas de carregamento com uma solução à base de glicerina e pó-de-talco, de modo a reduzir o atrito entre as placas e o provete, e assim obter um estado de tensão mais homogéneo no provete, conforme aconselhado na EN 12697-25 (CEN, 2005). No caso de espessuras baixas (inferior a 6 cm), como é o caso dos provetes das misturas BDLB, devem os mesmos ser sobrepostos ou colados.

No que respeita à aplicação da carga, a placa superior tem uma secção em contacto com o provete de 96 mm de diâmetro, como indicado na norma, e a placa inferior apresenta um diâmetro de 150 mm. Desta forma, consegue-se criar um certo efeito de confinamento devido à parte do provete que não é solicitada. Contudo, o estado de tensão será menos homogéneo que o que se obteria se a placa superior também tivesse 150 mm de diâmetro.

O condicionamento dos provetes, a 45°C, foi cumprido durante um mínimo de seis horas. Em termos de carregamento, adoptou-se uma carga do tipo sinusoidal com repouso de 1 segundo (Figura 4.48), sendo a pressão de 150 kPa assegurada para a carga de 1,1 kN e a duração de 2 horas (3600 ciclos). O tempo de carregamento adoptado representa uma baixa velocidade do tráfego, simulando assim uma situação de exigência para com a mistura. Já o tempo de repouso possibilita à mistura a recuperação da parte reversível da deformação.

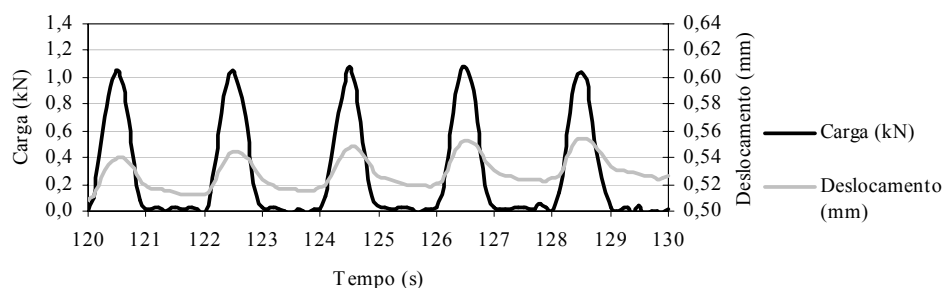


Figura 4.48 – Exemplo de forma da onda sinusoidal de carregamento adoptada e da correspondente evolução do deslocamento

De acordo com a norma deve aplicar-se um pré-carregamento com uma tensão de apenas 10 kPa de modo a conseguir um certo ajuste das placas ao provete, evitando assim algum erro nas leituras da deformação axial. Os dados adquiridos foram a força exercida na célula de carga e as leituras dos dois LVDT (*linear variable differential transducer*), colocados em lados opostos, para medir a deformação axial do provete. Na Figura 4.49 podem observar-se alguns pormenores relativos às placas, LVDT, em ensaio de dois provetes: um das misturas MBTE e outro das misturas BDLB.

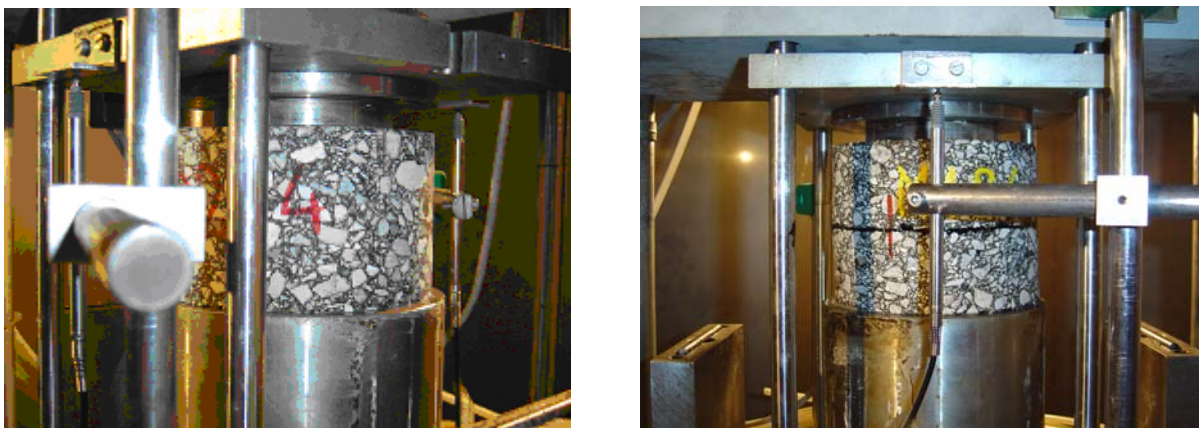


Figura 4.49 – Aspecto da máquina de ensaios com aplicação de cargas repetidas (FCTUC), quando usada em ensaios de compressão uniaxial

- Ensaio de compressão triaxial de cargas repetidas

O procedimento utilizado, no âmbito deste trabalho, para a realização do ensaio é o descrito na EN 12697-25 (CEN, 2005). O equipamento utilizado foi um equipamento comercial da marca *Wykeham Farrance*. A principal diferença relativamente ao ensaio de compressão uniaxial de cargas repetidas reside na imposição de uma pressão estática de confinamento ao provete. Este confinamento permite utilizar temperaturas e pressões de carregamento superiores sem provocar a rotura precoce do provete.

Neste ensaio os provetes são submetidos a uma tensão de confinamento estática, sendo solicitados por uma tensão axial dinâmica. Esta tensão axial pode assumir, segundo a norma, uma forma sinusoidal (Figura 4.50) ou uma forma rectangular (Figura 4.51).

O carregamento adoptado foi semelhante ao utilizado no ensaio de compressão uniaxial de cargas repetidas. Assim, utilizou-se um carregamento sinusoidal, com 1 segundo de tempo de carregamento e 1 segundo de tempo de repouso. A duração de ensaio considerada foi igualmente de 3600 ciclos.

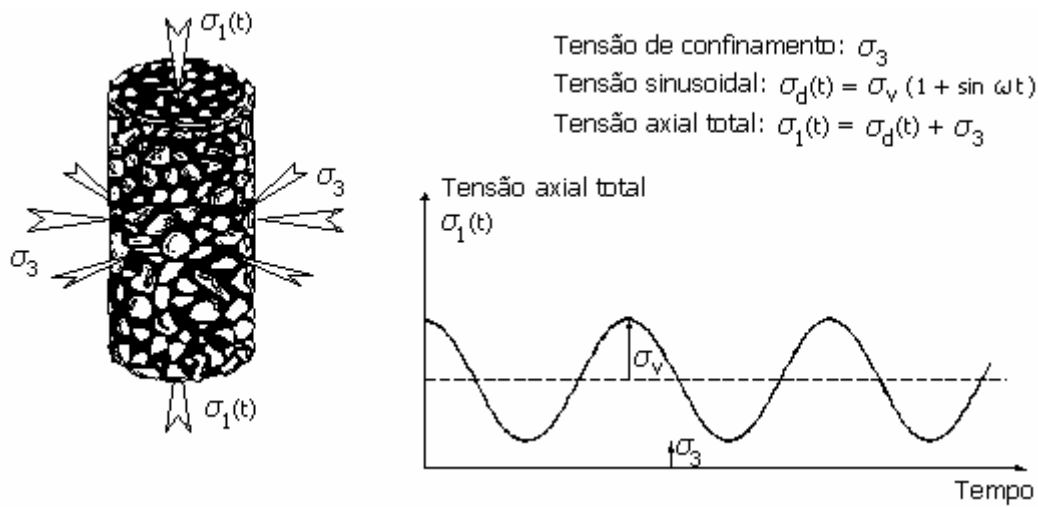


Figura 4.50 – Representação do carregamento sinusoidal (adaptado de CEN, 2005)

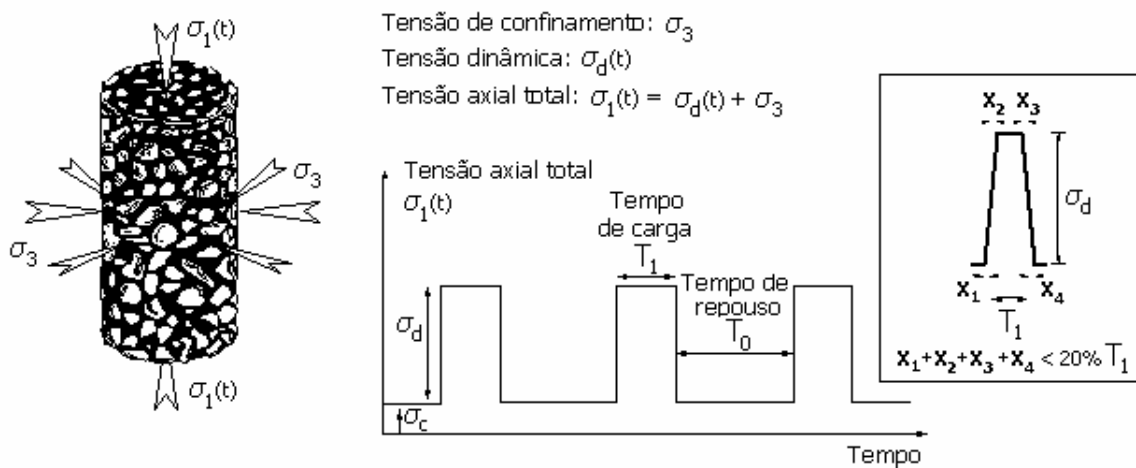


Figura 4.51 – Representação do carregamento pulsatório com repouso (adaptado de CEN, 2005)

A pressão de confinamento é um factor bastante importante na análise à deformação permanente de misturas betuminosas, poderá oscilar entre 50 kPa e 200 kPa (EN 12697-25), e deve ser escolhida criteriosamente, pois se esta for muito elevada as deformações permanentes observadas diminuem, tornando-se assim difícil distinguir quais as composições que apresentam melhor comportamento, para se utilizar pressões de confinamento muito baixas, torna-se mais simples e é menos oneroso realizar ensaios cíclicos uniaxiais.

Na norma são descritos três equipamentos diferentes e que se apresentam na Figura 4.52.

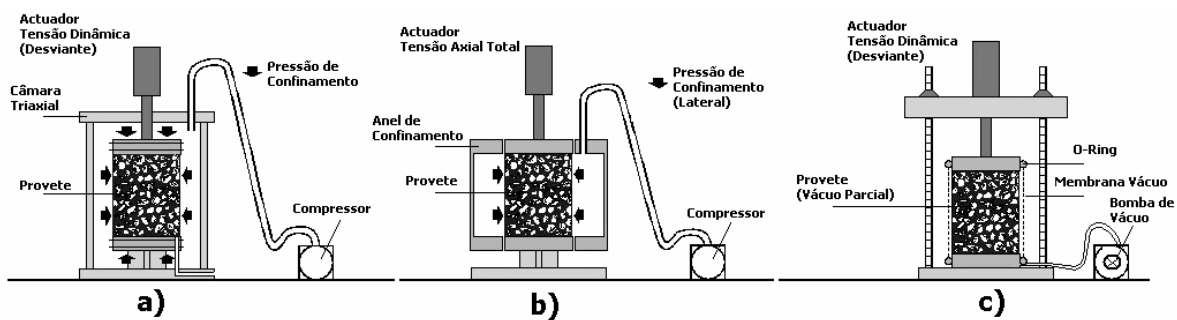


Figura 4.52 – Diferentes configurações para os equipamentos de ensaios de compressão triaxial de cargas repetidas (adaptado de CEN, 2005)

No equipamento do tipo a), utilizado neste trabalho (Figura 4.53), a tensão de confinamento é assegurada com água. As placas de carregamento estão dentro da câmara, sendo que deste modo a tensão de confinamento é aplicada a todo o provete, incluindo a direcção axial.



Figura 4.53 – Aspecto do equipamento para realização de ensaios de compressão triaxial (DEC-FCTUC)

A tensão axial dinâmica aplicada varia entre zero e a tensão desviante, σ_d . No equipamento representado na Figura 4.52-b) a tensão de confinamento é realizada com água. No entanto, as placas de carregamento estão no limite da câmara pelo que a tensão de confinamento é aplicada apenas na face lateral do provete. A tensão axial aplicada varia assim entre σ_3 e σ_1 .

No caso do equipamento da Figura 4.52-c) a tensão de confinamento é conseguida criando vácuo no interior do provete que se encontra envolvido por uma membrana lateralmente e

pelas placas de carregamento axialmente. Este método tem a desvantagem de só permitir aplicar tensões de confinamento até 100 kPa. A tensão axial aplicada varia entre zero e σ_d .

Tendo em conta as conclusões de Gardete (2005), optou-se pela tensão máxima de 600 kPa e uma tensão de confinamento de 200 kPa. A temperatura de ensaio escolhida foi, pelos motivos já expostos, de 45°C. Os provetes foram condicionados ao ar dentro de uma câmara térmica à temperatura de ensaio durante 3 horas, e em seguida foram colocados na câmara de ensaio triaxial. A câmara foi cheia com água e estabilizada a 45°C durante uma hora. Durante o ensaio a temperatura foi mantida constante dentro da câmara, respeitando os limites exigidos pela norma.

Este procedimento foi seguido devido ao facto de o equipamento de origem não estar preparado para regular a temperatura da água na câmara. A solução encontrada passou por colocar uma resistência de aquecimento a envolver a câmara de ensaio, utilizando duas sondas para medir a temperatura no interior da câmara ligadas a dois controladores de temperatura (Figura 4.54). Utilizou-se um termoacumulador para que a água colocada na câmara triaxial apresentasse uma temperatura semelhante à requerida para o ensaio.



Figura 4.54 – Colocação de uma resistência eléctrica envolvendo a câmara triaxial para controlo da temperatura de ensaio (Gardete, 2005)

Assim, antes de iniciar o ensaio, a temperatura dentro da câmara foi mantida constante introduzindo água quente e deixando sair água do seu interior (neste momento não existia tensão no interior). Após o início do ensaio a tensão dentro da câmara é elevada até à tensão de confinamento, deste modo não era possível fazer circular água. Assim, durante o ensaio a temperatura foi mantida estável pela resistência eléctrica cujo funcionamento é regulado pelos controladores de temperatura.

O carregamento foi aplicado com placas de 150 mm de diâmetro. Para minimizar o atrito entre as placas e o provete, minimizando o efeito de fronteira, foi aplicado em ambas as faces do provete um lubrificante feito à base de glicerina e talco (Figura 4.55-a e b). Durante o ensaio o provete não deve ficar em contacto com a água. Para isso é colocada uma membrana de borracha a envolver o provete. São utilizados dois “o-rings” para evitar a entrada de água para dentro da membrana (Figura 4.55-c).

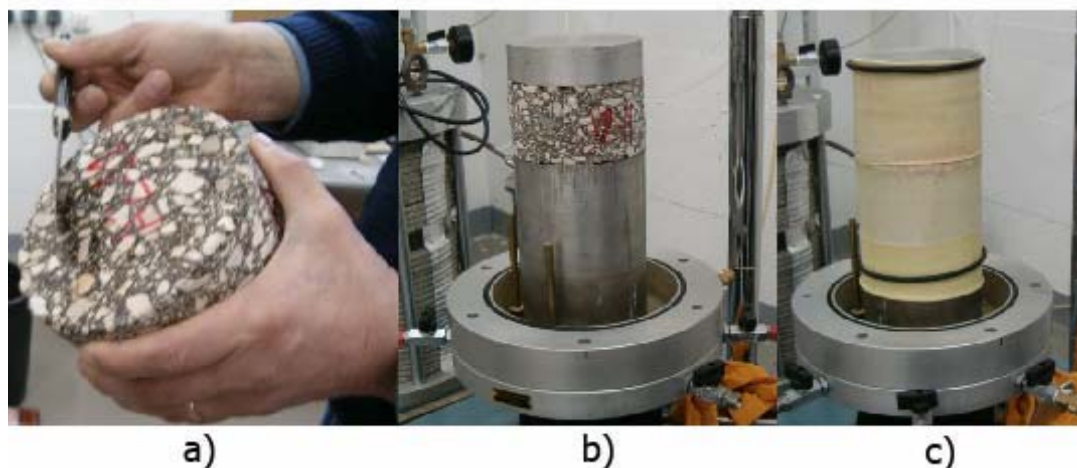


Figura 4.55 – Diferentes fases da preparação do ensaio de compressão triaxial cíclico (Gardete, 2005)

Antes de iniciar o ensaio realiza-se um pré-carregamento estático com a finalidade de evitar desajustes entre as placas de aplicação da carga e o provete, as quais podem influenciar os resultados. Este pré-carregamento faz-se sem aplicação da tensão de confinamento. A duração do pré-carregamento é de 120 segundos e a tensão aplicada é dada pela expressão (CEN, 2005):

$$\sigma_{PC} = 0,02 (2 \sigma_d + \sigma_3) \quad (4.4)$$

com,

σ_{PC} – Tensão de pré-carregamento;

σ_d – Tensão desviante, igual à diferença entre a tensão máxima (σ_1) e a tensão de confinamento (σ_3);

Para o nível de tensão adoptado, utilizou-se uma tensão de pré-carregamento de 20 kPa. Utilizaram-se dois LVDT para obter a evolução da deformação dos provetes durante o ensaio, estes foram colocados de forma a ficarem diametralmente opostos entre si. As leituras foram adquiridas automaticamente pelo *software* de controlo do equipamento.

- Ensaios com simulador de tráfego (*Wheel Tracking*)

Os ensaios com simulador de tráfego, habitualmente designados por ensaios de *Wheel Tracking*, foram realizados com o equipamento existente no DEC-FCTUC (Figura 4.56), o qual permite ensaiar lajes de $30 \times 30 \times h \text{ cm}^3$, com ($h \leq 80 \text{ mm}$), tal como é preconizado na EN 12697-22, *Test Methods for Hot Mix Asphalt – Wheel Tracking*, (CEN, 2003). Esta recomenda, para o tipo de misturas em estudo, que as lajes apresentem uma espessura de 80 mm e que a carga rolante aplicada seja de 700 N.

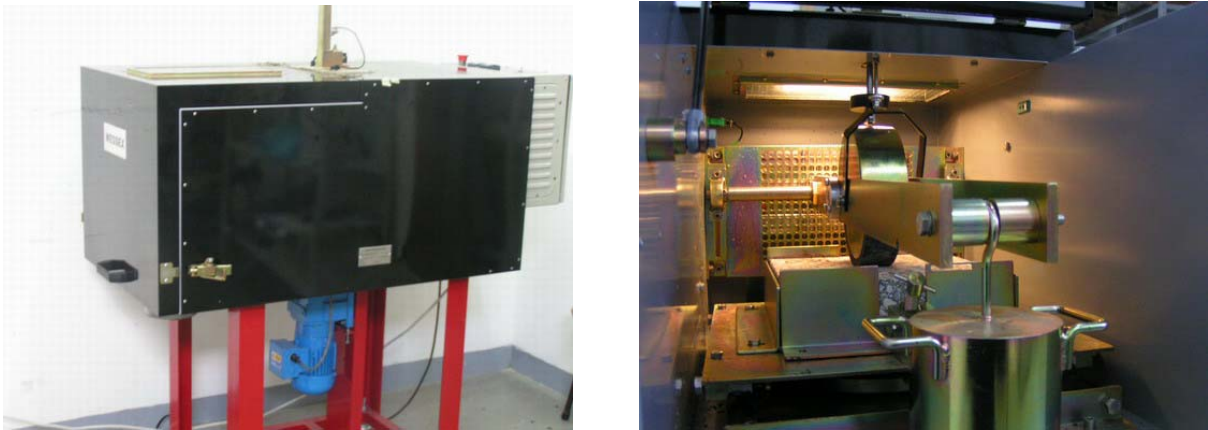


Figura 4.56 – Aspecto do simulador de tráfego *Wessex Wheel Tracker*, DEC-FCTUC

O condicionamento, ao ar, decorreu durante um mínimo de seis horas e a temperatura de ensaio, como já se referiu, fixou-se em 45°C. Adoptou-se uma duração de 45 minutos e uma velocidade de aplicação da carga de 21 ciclos/minuto, correspondendo cada ciclo a duas passagens.

O procedimento de ensaio seguido foi o descrito na EN 12697-22 (CEN, 2003), que define de forma clara algumas das condições de ensaio, nomeadamente dimensões dos provetes e forma de carregamento. Existem outras condições, como por exemplo, a temperatura, que a norma deixa em aberto. É comum este ensaio ser realizado com temperaturas que variam entre 40°C a 60°C. Algumas normas estrangeiras adoptam para temperatura de ensaio os 60°C (DGC, 1984 e BSI, 1998). A norma não especifica a tensão de contacto da roda, indicando que esta deve aplicar uma carga de 700 N ao provete. Uma avaliação realizada em laboratório permitiu estimar a tensão de contacto da roda em aproximadamente 700 kPa.

4.9 Avaliação Estrutural com Deflectómetro de Impacto

No âmbito da execução dos trechos experimentais com misturas betuminosas recicladas a quente em central, foi avaliada a capacidade de carga com recurso ao deflectómetro de impacto (FWD), antes e depois da execução dos trechos experimentais. Realizaram-se os ensaios com placa de 300 mm de diâmetro e foram impostas quatro alturas de queda, se bem

que, em termos de análise, apenas se consideraram as duas últimas, por se admitir que os dois primeiros impactos apenas servem para ajustar/calibrar o equipamento. Efectuaram-se leituras em nove pontos: no centro da placa (f_0) e em pontos afastados, em mm, de: 300 (f_1), 450 (f_2), 600 (f_3), 900 (f_4), 1200 (f_5), 1500 (f_6), 1800 (f_7) e 2100 (f_8). Na Figura 4.57 mostra-se o deflectómetro de impacto usado nos ensaios.



Figura 4.57 – Aspecto do deflectómetro de impacto, UC-UM

O pavimento dos trechos experimentais, construído em zona de aterro, apresentava uma estrutura base constituída por uma camada de materiais de natureza muito diversa (materiais granulares e aglutinados, nomeadamente desperdícios de misturas betuminosas ali depositados), com espessura da ordem dos 25 cm e encarada na análise como uma “sub-base”, e que veio revelar características de deformabilidade muito variáveis. Os ensaios foram realizados com uma temperatura à superfície do pavimento da ordem dos 12°C a 13°C.

Depois de algumas tentativas, considerou-se na análise a estrutura tipo indicada na Figura 4.58. No Quadro 4.51 indicam-se a espessura média e a adoptada na análise. Recorrendo à aplicação ELSYM5 na análise estrutural e seguindo a metodologia habitualmente designada por análise inversa, ou *back-calculation*, determinaram-se os módulos de deformabilidade das camadas. Na análise considerou-se para o coeficiente de *Poisson*, 0,30 para a camada de sub-base e 0,35 para a fundação e camada betuminosa.

Camada Betuminosa ($E_m, \mu_{sb}=0,30$)	$h = 0,085$ a $0,10$ m
“Sub-base” ($E_{sb}, \mu_{sb}=0,30$)	0,25m
Fundação ($E_{sf}, \mu_{sf}=0,35$)	2,00m
$E = 1000$ MPa; $\mu = 0,30$	$h = \infty$

Figura 4.58 – Estrutura-tipo considerada na análise inversa

Quadro 4.51 – Espessura da camada betuminosa (média e adoptada)

Mistura	A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2	C3	D1	D2	D3
Espessura média (cm)	8,6	9,3	10,0	9,6	9,9	9,6	8,5	9,0	9,6	8,9	9,5	9,9
Espessura adoptada (cm)	8,5	9,5	10,0	9,5	10,0	9,5	8,5	9,0	9,5	9,0	9,5	10,0

No Quadro 4.52 apresenta-se um resumo dos resultados a que se chegou em termos de módulos de deformabilidade: Esf, o módulo do solo de fundação; Esb, o módulo da “sub-base”; Em13, o módulo da camada betuminosa. A baixa temperatura à superfície do pavimento, conjugada com um ligante final duro, justifica os valores altos encontrados.

Quadro 4.52 – Módulo de deformabilidade das camadas calculados a partir dos resultados dos ensaios com deflectómetro de impacto

Mistura	Esf (MPa)	Esb (MPa)	Em13 (MPa)
A1	80	140	10000
A2	100	200	16000
A3	100	400	16000
B1	100	150	15000
B2	100	260	16000
B3	100	500	16000
C1	120	400	20000
C2	100	300	19000
C3	120	160	11000
D1	140	400	18000
D2	120	180	16000
D3	110	130	12000

Depois de avaliado o módulo de deformabilidade das camadas betuminosas, a 13°C, procedeu-se à sua correcção para a temperatura de 25°C através dum factor de correcção dado pela seguinte expressão:

$$K_{25} = \frac{Em_{25}}{Em_{13}} \quad (4.5)$$

onde,

Em₂₅ - Estimativa do módulo de deformabilidade da mistura betuminosa a 25°C;

Em₁₃ - Estimativa do módulo de deformabilidade da mistura betuminosa a 13°C;

Na estimativa do módulo de deformabilidade das misturas tomaram-se como referência as expressões de previsão da Shell (Picado-Santos, 1993) e as características médias das misturas compactadas provenientes dos trechos experimentais. A penetração do ligante calculou-se a partir da expressão (3.68), referida no Capítulo 3, e tendo por base as características do betume novo e do ligante do material fresado. No Quadro 4.53 apresentam-se os módulos de

deformabilidade estimados, o factor de correcção e os módulos de deformabilidade a 13°C e corrigidos para a temperatura de 25°C.

Quadro 4.53 – Módulos de deformabilidade das camadas betuminosas estimados e calculados a partir dos resultados dos ensaios com deflectómetro de impacto

Mistura	<u>Módulos de deformabilidade estimados (Shell)</u>			<u>Módulos de deformabilidade (FWD)</u>	
	Em13 (MPa)	Em25 (MPa)	K ₂₅	Em13 (MPa)	Em25 (MPa)
A1	14000	6550	0,47	10000	4680
A2	14010	6320	0,45	16000	7220
A3	13650	5950	0,44	16000	6970
B1	14770	7190	0,49	15000	7300
B2	15050	7050	0,47	16000	7500
B3	15960	7390	0,46	16000	7410
C1	14140	6860	0,49	20000	9700
C2	14390	6780	0,47	19000	8950
C3	16140	7520	0,47	11000	5130
D1	17590	8900	0,51	18000	9110
D2	15370	7440	0,48	16000	7740
D3	16910	8090	0,48	12000	5740

Na Figura 4.59 faz-se a representação gráfica dos módulos de deformabilidade a 25°C, obtidos por correcção dos valores da avaliação estrutural e estimados pelas expressões da Shell. Os valores são muito próximos nas misturas B1, B2, B3, D1 e D2, mais altos que o previsível nas misturas A2, A3, C1 e C2 e mais baixos nas misturas A1, C3 e D3. Os módulos de deformabilidade a que se chegou poderão constituir uma referência, havendo, no entanto que confirmar tais indicações, na análise dos resultados da avaliação das características de deformabilidade que se irão realizar no capítulo seguinte.

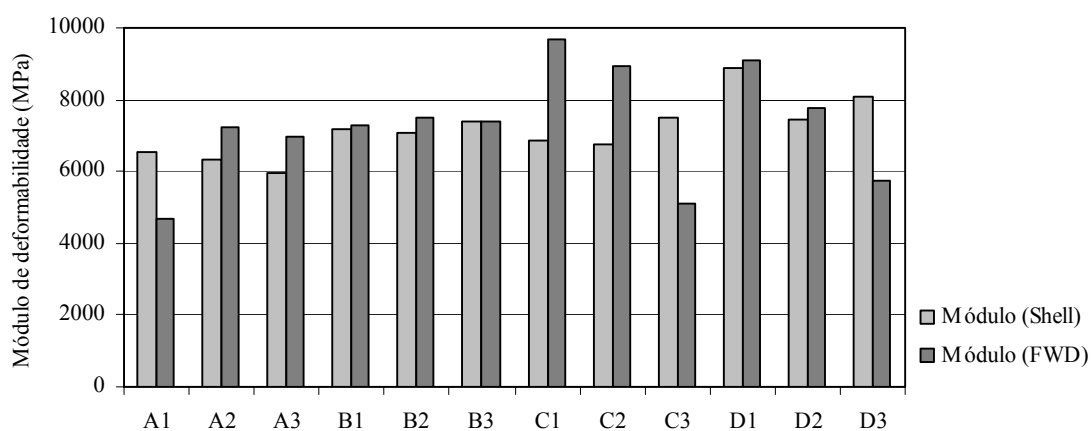


Figura 4.59 – Comparação entre os módulos de deformabilidade a 25°C, obtidos na avaliação com FWD e estimados pelas expressões da Shell

4.10 Considerações Finais

Ao longo do capítulo fez-se uma descrição dos trabalhos experimentais levados a cabo no âmbito da presente investigação. Justificaram-se as opções tomadas, tendo ficado patentes algumas limitações próprias de trabalhos experimentais dependentes das raras oportunidades de transpor para obra novas tecnologias.

Interessaria, por exemplo, estudar outros tipos de misturas e ir mais longe na taxa de reciclagem, sendo para isso necessário aquecer o material fresado. Contudo, entende-se que as misturas seleccionadas, aplicadas nos trechos experimentais e produzidas e compactadas em laboratório, e cuja avaliação das características mecânicas em laboratório será objecto do capítulo seguinte, são suficientes para alcançar os objectivos definidos inicialmente. Para além disso admite-se que na prática a reciclagem a quente em central será sobretudo realizada sem recurso a pré-aquecimento do material fresado.

4.11 Referências Bibliográficas

- APORBET (1998). “Misturas Betuminosas: Contribuição para a normalização do fabrico e da aplicação”. Associação Portuguesa de Fabricantes de Misturas Betuminosas, Lisboa.
- Baptista, A. M. e Picado-Santos, L. (2006). “Reciclagem de Misturas Betuminosas a Quente em Central: contribuição para a sua caracterização mecânica”. Engenharia Civil, Revista do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, Guimarães, n.º 26, pp. 29-43.
- Baptista, A. M. (1999). “Dimensionamento de Pavimentos Rodoviários Flexíveis - Aplicabilidade em Portugal dos métodos existentes”. Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da F.C.T. da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Branco, F., Pereira, P. e Picado-Santos, L. (2005). “*Pavimentos Rodoviários*”. Edições Almedina (ISBN 972-40-2648-5), Coimbra.
- BSI (1998). “Sampling and Examination of Bituminous Mixtures for Roads and Other Paved Areas – Part 110: Methods of Test for the Determination of *Wheel Tracking Rate and Depth*”. *BS 598-110*, BSI Standards, Inglaterra.
- Capitão, S. (2003). “Caracterização Mecânica de Misturas Betuminosas de alto Módulo de Deformabilidade”. Tese de Doutoramento, Departamento de Engenharia Civil da F.C.T. da Universidade de Coimbra, 2 vol., Coimbra.
- CEN (2005). “Bituminous mixtures – test methods for hot mix asphalt - Part 25: Cyclic Compression test”. *EN 12697-25*, European Committee for Standardization, Bruxelas .
- CEN (2004-a). “Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 24: Resistance to fatigue”. *EN 12697-24*, European Committee for Standardization, Bruxelas.
- CEN (2004-b). “Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 26: Stiffness”. *EN 12697-26*, European Committee for Standardization, Bruxelas.

- CEN (2003). “Bituminous mixtures – test methods for hot mix asphalt - Part 22: *Wheel Tracking*”. *EN 12697-22*, European Committee for Standardization, Bruxelas.
- Claessen, A., Edwards, J., Sommer, P. e Ugé, P. (1977). “Asphalt Pavement Design Manual: the SHELL Method”. Proceedings of 4th International Conference on Structural Design of Asphalt Pavements, University of Michigan, pp 39-74, Ann Arbor - Michigan.
- DGC (1984). “Resistencia a la Deformación Plástica de las Mezclas Bituminosas Mediante la Pista de Ensayo de Laboratorio”. *NLT-173*, Dirección General de Carreteras, Ministerio de Fomento, Espanha.
- EAPA (1998). “*Directivas ambientais sobre as melhores técnicas disponíveis (BAT) para a produção de misturas betuminosas*”. Tradução da APORBET. Edição da European Asphalt Pavement Association (ISBN 90-801214-9-5), Breukelen, Holanda.
- Freire, A. (2002). “Deformações Permanentes de Misturas Betuminosas em Pavimentos Rodoviários”. Tese de Doutoramento, Departamento de Engenharia Civil da F.C.T. da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Gardete, D. (2005). “Comparação de Ensaio Laboratoriais para a Caracterização de Misturas Betuminosas à Deformação Permanente”. Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da F.C.T. da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- JAE (1995). “*Manual de Concepção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional*”. Junta Autónoma de Estradas (actual EP), Almada.
- JAE (1998). “Caderno de Encargos: 03-pavimentação”. Junta Autónoma de Estradas (actual EP), volume V, Almada.
- Picado-Santos, L. (2005). “Formulação de Misturas Betuminosas a Quente”. Sumário da Lição de Síntese da Agregação. Departamento de Engenharia Civil da F.C.T. da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Picado-Santos, L. e Baptista, A. M. (2004). “Reciclagem a quente de misturas Betuminosas em Central”. *4.º Relatório de Progresso, Protocolo de Cooperação Departamento de Engenharia Civil da F.C.T. da Universidade de Coimbra /LUSOS CUT-CP*, Coimbra.
- Picado-Santos, L. e Baptista, A. M. (2003). “IP5 – Estudo da Reciclagem a Quente em Central”. *3.º Relatório de Progresso, Protocolo de Cooperação Departamento de Engenharia Civil da F.C.T. da Universidade de Coimbra /LUSOS CUT-CP*, Coimbra.
- Picado-Santos, L., Baptista, A. M. (2002). “IP5 – Troço Angeja/A1. Estudo da Reciclagem do Pavimento”. *2.º Relatório de Progresso, Protocolo de Cooperação Departamento de*
- Picado-Santos, L. (1995). “Consideração da temperatura no dimensionamento de pavimentos rodoviários flexíveis”. Tese de Doutoramento, Departamento de Engenharia Civil da F.C.T. da Universidade de Coimbra, 2 vol., Coimbra.
- Picado-Santos, L. (1993). “Método de dimensionamento da Shell para pavimentos rodoviários flexíveis (adaptação às condições portuguesas)”. Departamento de Engenharia Civil - F.C.T. da Universidade de Coimbra, Coimbra.

- Powell, W. D.; Potter, J. F.; Mayhew, H. C. e Nunn, M. E. (1984). "The structural design of bituminous roads". TRRL Report LR 1132, Transport and Road Research Laboratory, Berkshire, Reino Unido.
- Rubio, A. R. (2003). "Reciclado de mezclas bituminosas en planta en caliente: processo, ventajas y limitaciones, empleo y perspectivas". Carreteras (Especial Reciclado de Firmes), Revista Técnica de la Asociación Española de la Carretera, n.º 118, pp. 11-27.
- University of Nottingham (1986). "Bituminous pavements: materials, design and evaluation". Lecture Notes of a residential Course in University of Nottingham, University of Nottingham, Nottingham.
- Van der Poel, C. (1954). "A general system describing the visco-elastic properties of bitumen and its relation to routine test data". Journal of Applied Chemistry, Vol. 4, pp. 221-236.

5 ANÁLISE DE RESULTADOS

5.1 Considerações Iniciais

As regras e orientações previstas nos documentos normativos nacionais, para as misturas betuminosas fabricadas a quente, não contemplam a avaliação das propriedades mecânicas fundamentais das misturas betuminosas: as características de deformabilidade, a resistência à fadiga e a resistência à deformação permanente. No entanto, dando cumprimento à Directiva Europeia 89/106/CE – Produtos da Construção, estes aspectos estão previstos na norma europeia que se prevê entrar em vigor em 2008, não só para as misturas tradicionais mas também para as recicladas.

No capítulo anterior verificou-se que as características das misturas estudadas, nomeadamente as aplicadas nos trechos experimentais, não cumpriam integralmente as exigências previstas no CEEP (JAE, 1998). No entanto, tal como se referiu no Capítulo 4, entende-se que tal “desconformidade” não deve impedir que as misturas sejam validadas com base na realização de ensaios de desempenho.

A caracterização mecânica assume assim um papel fundamental, podendo confirmar ou invalidar a composição de uma determinada mistura, ou ainda validar misturas que à partida não satisfaçam cabalmente todos os limites do caderno de encargos. Por isso, avaliaram-se as características de deformabilidade, a resistência à fadiga e à deformação permanente, para todas as misturas estudadas. Neste capítulo apresentam-se e analisam-se os resultados dos ensaios que se indicam no Quadro 5.1.

Quadro 5.1 – Resumo dos ensaios de desempenho realizados em laboratório

Tipo de mistura	Ensaios de desempenho realizados
Macadame betuminoso aplicado nos trechos experimentais (MBTE)	- Avaliação do módulo de deformabilidade e do ângulo de fase; - Avaliação da resistência à fadiga; - Avaliação da resistência à deformação permanente (ensaio de compressão uniaxial, de compressão triaxial e com simulador de tráfego).
Macadame betuminoso produzido e compactado em laboratório (MBLB)	- Avaliação do módulo de deformabilidade e do ângulo de fase; - Avaliação da resistência à fadiga; - Avaliação da resistência à deformação permanente (compressão uniaxial).
Betão betuminoso produzido e compactado em laboratório (BDLB)	- Avaliação do módulo de deformabilidade e do ângulo de fase; - Avaliação da resistência à fadiga; - Avaliação da resistência à deformação permanente (compressão uniaxial).

Entendeu-se oportuno fazer antes uma descrição das metodologias de apresentação e análise dos resultados dos diversos ensaios de desempenho realizados. Nesta fase apresenta-se ainda um método de interpretação com base no conceito de energia dissipada.

Equacionaram-se duas formas de apresentar e analisar os resultados: exposição e análise por grupo de misturas ou, em alternativa, uma análise por tipo de ensaio. Optou-se pela primeira hipótese, pois segue a sequência da realização dos trabalhos e, por isso, facilita a análise comparativa dos resultados.

Neste capítulo, a seguir analisam-se os resultados experimentais. Primeiro estudam-se os resultados das misturas de macadame betuminoso aplicadas nos trechos experimentais (MBTE), depois os relativos às misturas de macadame betuminoso produzidas e compactadas em laboratório (MBLB) e, por fim, os relativos às misturas de betão betuminoso produzidas em laboratório (BDLB).

Dentro de cada um dos três grupos de misturas, analisam-se os valores medidos, por tipo de ensaio, e estuda-se a influência da composição das misturas nas suas características mecânicas. No caso particular do módulo de deformabilidade e do ângulo de fase, avaliou-se ainda o efeito das condições de ensaio. É ainda proposta uma metodologia de análise global do desempenho das misturas.

5.2 Metodologias de Apresentação e Análise dos Resultados dos Ensaios de Desempenho

5.2.1 Ensaios de avaliação do módulo de deformabilidade e do ângulo de fase

O módulo de deformabilidade e o ângulo de fase podem ser representados graficamente recorrendo a vários métodos. Podem usar-se as curvas isotérmicas, as curvas isócronas, as curvas mestras, o diagrama de *Black* ou o diagrama de *Cole-Cole*. Tomando como referência trabalho de Capitão (2003), passam a descrever-se esses processos recorrendo, para o efeito, a resultados dos trabalhos experimentais.

Nas curvas isotérmicas, representa-se a relação entre os módulos (ou os ângulos de fase) e a frequência de carregamento, podendo assim avaliar-se a influência da frequência nos parâmetros de deformabilidade, para as diferentes temperaturas de ensaio. Na Figura 5.1 apresenta-se o exemplo das curvas isotérmicas relativas à mistura D1. Como é normal, observa-se um aumento do módulo de deformabilidade com o incremento da frequência de carregamento. No que respeita ao ângulo de fase, normalmente decresce com o aumento da frequência. Para a temperatura mais alta (a 40°C) há uma variação atípica entre 5 Hz e 10 Hz, embora de valor desprezável.

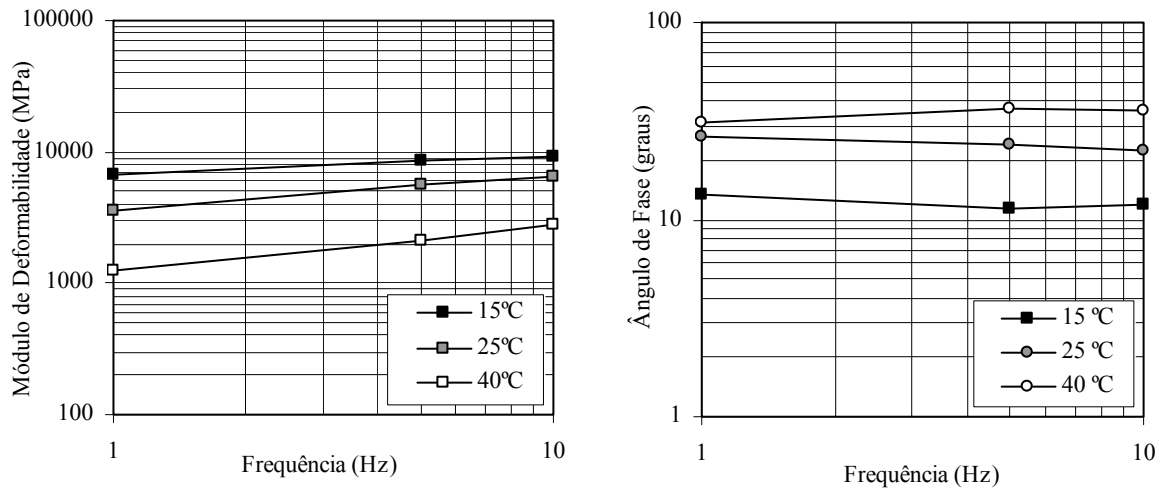


Figura 5.1 – Exemplo de curvas isotérmicas do módulo de deformabilidade e do ângulo de fase (mistura D1)

Nas curvas isócronas pode avaliar-se a influência da temperatura nas características de deformabilidade da mistura. Estas apresentam, para cada uma das frequências de ensaio, a variação do módulo de deformabilidade, ou do ângulo de fase, em função da temperatura. Na Figura 5.2 mostram-se as curvas isócronas da mistura D1. Nestas curvas confirma-se a elevada susceptibilidade térmica das misturas betuminosas, diminuindo o módulo com o aumento da temperatura. Quanto ao ângulo de fase passa-se o inverso, aumentando com o incremento da temperatura.

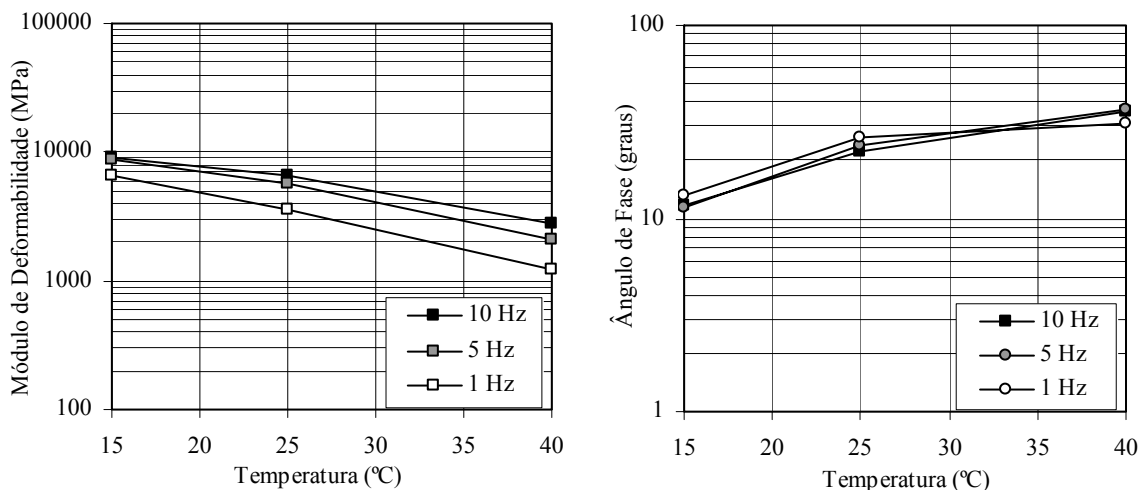


Figura 5.2 – Exemplo de curvas isócronas do módulo de deformabilidade e do ângulo de fase (mistura D1)

As curvas mestras são curvas únicas representativas do material para uma dada temperatura de referência (T_{REF}). A curva assenta no “princípio de equivalência frequência-temperatura”, e relaciona o módulo de deformabilidade (ou o ângulo de fase) com uma variável, a frequência reduzida, f_R , dada pela equação (5.1), a qual representa a sobreposição dos efeitos da frequência e da temperatura (Capitão, 2003).

$$f_R = \alpha_T \times f \quad (5.1)$$

em que,

f - frequência de ensaio (Hz);

α_T - parâmetro dado pela equação (5.2).

$$\log(\alpha_T) = 0,4343 \frac{\Delta H}{R} \left(\frac{1}{T + 273} - \frac{1}{T_{REF} + 273} \right) \quad (5.2)$$

onde,

ΔH - energia de activação aparente, em J/mole (da ordem dos 210000 J/mole);

R - constante universal dos gases ideais ($8,31441 \text{ Jmole}^{-1} \text{ K}^{-1}$);

T - temperatura de ensaio ($^{\circ}\text{C}$);

T_{REF} - temperatura de referência ($^{\circ}\text{C}$).

Na Figura 5.3 apresentam-se as curvas mestras das misturas de macadame betuminoso, D1 e D3, onde se pode confirmar que globalmente a mistura D1, apresenta módulo de deformabilidade superior a D3. Quando aplicada ao ângulo de fase, esta metodologia conduziu a curvas sem tendência definida, pelo que não se apresenta.

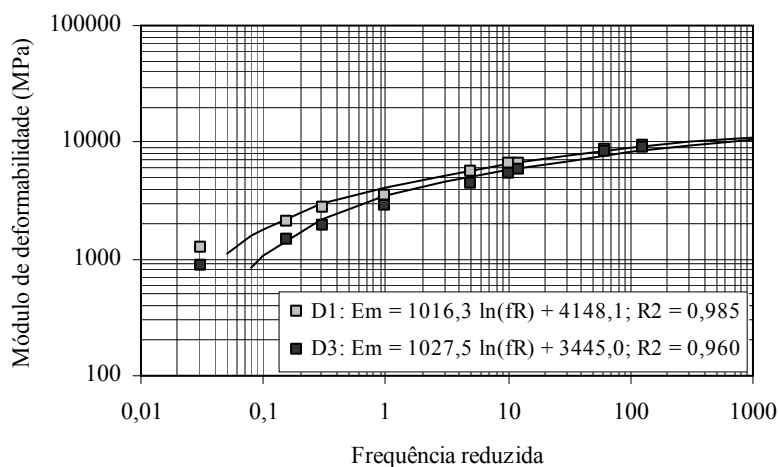


Figura 5.3 – Exemplo de curvas mestras do módulo de deformabilidade das misturas D1e D3

O diagrama de *Black* é usado para representar a relação entre o módulo de deformabilidade e o ângulo de fase (ϕ), sendo independente da temperatura e da frequência (Capitão, 2003). No gráfico, os valores de ϕ são representados em abcissa, por ordem inversa, e os do módulo de deformabilidade em ordenadas em escala logarítmica. A relação usada é do tipo linear:

$$E_m = A + B \phi \quad (5.3)$$

Não obstante, verificou-se que, na gama de frequências considerada, a relação entre o módulo e o ângulo de fase depende da frequência, como se observa na Figura 5.4 (mistura D1). Por isso, ao usar este método, irão considerar-se apenas os valores relativos às frequências mais altas (10 Hz e 5 Hz). Na gama de temperaturas usadas nos ensaios (de 15°C a 40°C) e frequências de 10 Hz e 5 Hz, a relação entre as duas grandezas é praticamente linear.

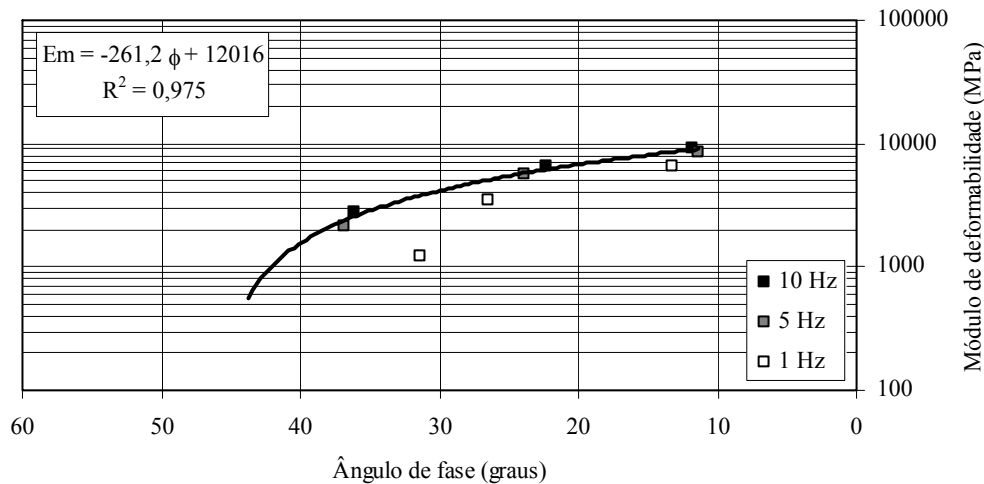


Figura 5.4 – Exemplo de relação entre o módulo de deformabilidade e o ângulo de fase, representada no diagrama de *Black* (mistura D1)

Por fim, a representação gráfica no diagrama de *Cole-Cole*, que também leva em conta a dependência entre o módulo de deformabilidade e o ângulo de fase, pois representa a relação entre a parte imaginária do módulo de deformabilidade (E_2) e a respectiva parte real (E_1). As definições destas grandezas (E_1 e E_2) apresentaram-se no Capítulo 3 (equações 3.43 e 3.44, página 55).

Alguns autores, como Momm (2005), referem que, tal como no diagrama de *Black*, a relação entre as componentes imaginária e real do módulo é independente da temperatura e da frequência. No entanto trata-se de uma simplificação, visto que a partir dos resultados indicados na Figura 5.5, podia estabelecer-se uma curva no digrama de *Cole-Cole* para cada frequência de ensaio, unindo os pontos relativos a cada frequência de ensaio.

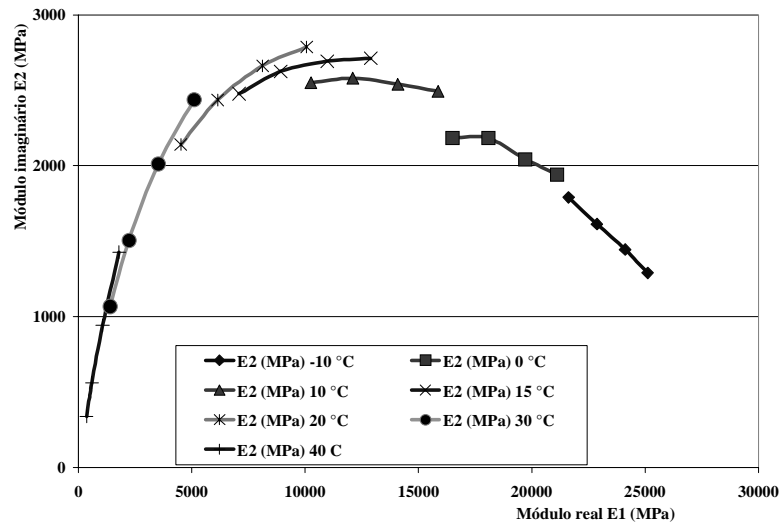


Figura 5.5 – Relação entre as partes real (E_1) e imaginária (E_2) do módulo de deformabilidade, representada no diagrama de *Cole-Cole* (Momm, 2005)

Por isso, mais uma vez se verificou que os valores medidos a 1 Hz provocam alguma dispersão nos resultados. A partir da relação entre o módulo de deformabilidade e o ângulo de fase, do diagrama de *Black*, e tendo em conta as equações da parte real e imaginária de módulo complexo, pode traçar-se a curva teórica de ajuste no diagrama de *Cole-Cole*. Para cada valor do módulo de deformabilidade, E_m , estima-se o ângulo de fase pela equação (5.4), obtida de (5.3), e calculam-se as componentes E_1 e E_2 pelas equações (3.43) e (3.44). Repare-se que a curva teórica encaixa nos pontos do diagrama relativos a 10 Hz e 5 Hz (Figura 5.6).

$$\phi = \frac{E_m - A}{B} \tag{5.4}$$

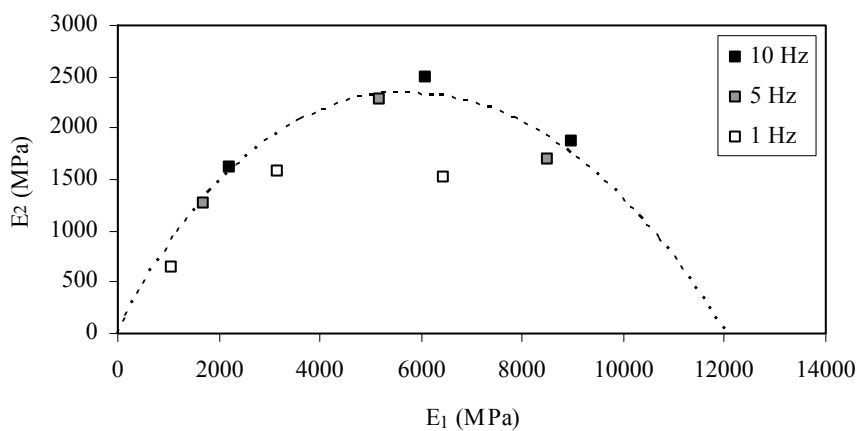


Figura 5.6 – Exemplo de relação entre as partes real (E_1) e imaginária (E_2) do módulo de deformabilidade, representada no diagrama de *Cole-Cole* (mistura D1)

Escolheram-se as curvas isotérmicas para apresentação detalhada dos resultados nos anexos do trabalho. Na análise dos resultados usam-se alguns dos métodos apresentados e outras formas simples de representação gráfica dos valores medidos, como seja em histogramas.

5.2.2 Ensaio de avaliação da resistência à fadiga

À semelhança dos restantes ensaios de desempenho, os métodos de interpretação e representação gráfica dos resultados dos ensaios de fadiga constituem uma ferramenta de análise fundamental. Existem várias metodologias para interpretar os resultados dos ensaios de fadiga (Capitão, 2003). Aqui, além do método geral (ou clássico) são apresentadas duas adaptações, uma com base numa lei de ajuste à evolução do módulo de deformabilidade e outra usando o conceito de energia dissipada. Recorde-se que se realizaram os ensaios de fadiga em extensão controlada e se usou como critério de paragem dos ensaios a redução em 50% do módulo de deformabilidade.

Em todos os métodos, o objectivo passa por estabelecer uma lei do tipo da equação (5.5), que relaciona a extensão de tracção (ε) com o número de ciclos de carga no final do ensaio (N). Os parâmetros A e B dependem do material e são calibrados a partir dos pares de valores (ε_i, N_i) obtidos seguindo a metodologia adoptada.

$$\varepsilon = A \times N^B \quad (5.5)$$

- Método geral

Na metodologia geral, ou clássica, em cada ensaio N representa o número de ciclos correspondente a uma determinada redução do módulo de deformabilidade da mistura. Habitualmente toma-se como referência uma redução de 50%. Como exemplo mostra-se na Figura 5.7 a evolução do módulo de deformabilidade registada em três ensaios com provetes da mistura D2, cada um deles relativo a uma extensão diferente.

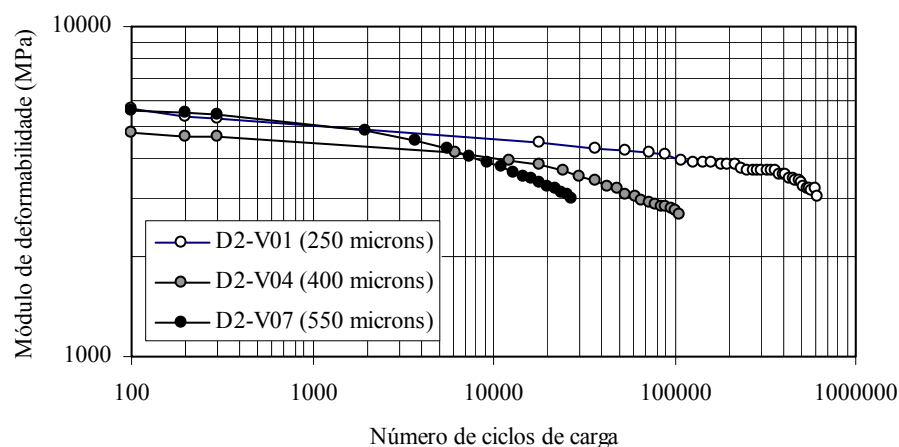


Figura 5.7 – Exemplo de evolução do módulo de deformabilidade em ensaio de fadiga, com provetes da mesma mistura (D2), para três níveis de extensão controlada

Pode também observar-se a influência da percentagem de betume no comportamento à fadiga das misturas. Para o mesmo nível de extensão, em misturas com a mesma composição granulométrica, regra geral, as mais ricas em betume apresentam um melhor desempenho à fadiga. Como exemplo ilustrativo, mostra-se na Figura 5.8 a evolução do módulo de deformabilidade em ensaios de fadiga, realizados com provetes das misturas R1 e R2 a uma extensão controlada de 500 microns.

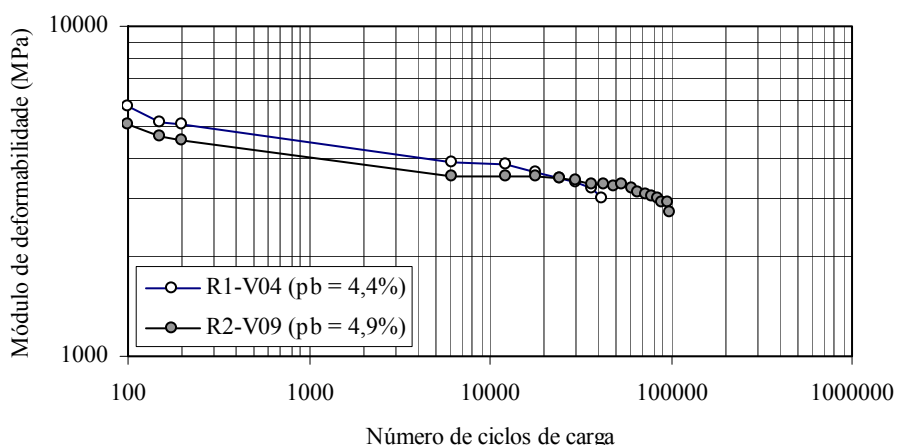


Figura 5.8 – Exemplo de evolução do módulo de deformabilidade em ensaio de fadiga, com provetes das misturas R1 e R2, para uma extensão controlada de 500 microns

No Quadro 5.2 apresentam-se os resultados dos nove provetes (vigas) relativos à mistura D2, e que permitiram estabelecer a respectiva lei de fadiga (Figura 5.9).

Quadro 5.2 – Resumo dos resultados da extensão média, número de ciclos na rotura, obtidos nos ensaios de fadiga da mistura D2

Proвете	Extensão (microns)	Número de ciclos
D2-V01	253,6	611137
D2-V05	229,9	321611
D2-V08	228,8	728031
D2-V02	363,4	144011
D2-V04	392,9	105163
D2-V09	364,9	114009
D2-V03	585,0	39474
D2-V07	571,3	35015
D2-V10	542,7	25570

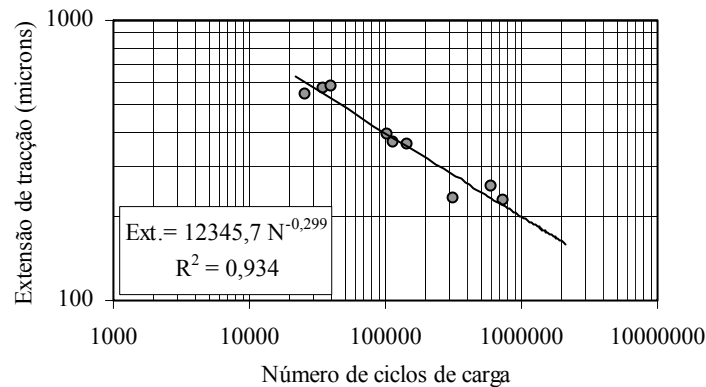


Figura 5.9 – Exemplo de lei de fadiga (mistura D2)

- Método geral adaptado

Uma das hipóteses de tratamento dos resultados de ensaios de fadiga (Capitão, 2003), com extensão controlada, é a relação entre o módulo de deformabilidade (E_m) e o número de ciclos de carga (N), seguir ao longo do ensaio uma lei exponencial (5.6).

$$E_m = E_0 \times e^{b N} \quad (5.6)$$

Como exemplo, mostra-se na Figura 5.10 o ajuste dos resultados anteriores (os representados na Figura 5.7) a uma lei daquele tipo, usando todos os resultados dos ensaios, embora na figura, por razões de nitidez apenas se desenhe um ponto por cada 300 ciclos de aquisição.

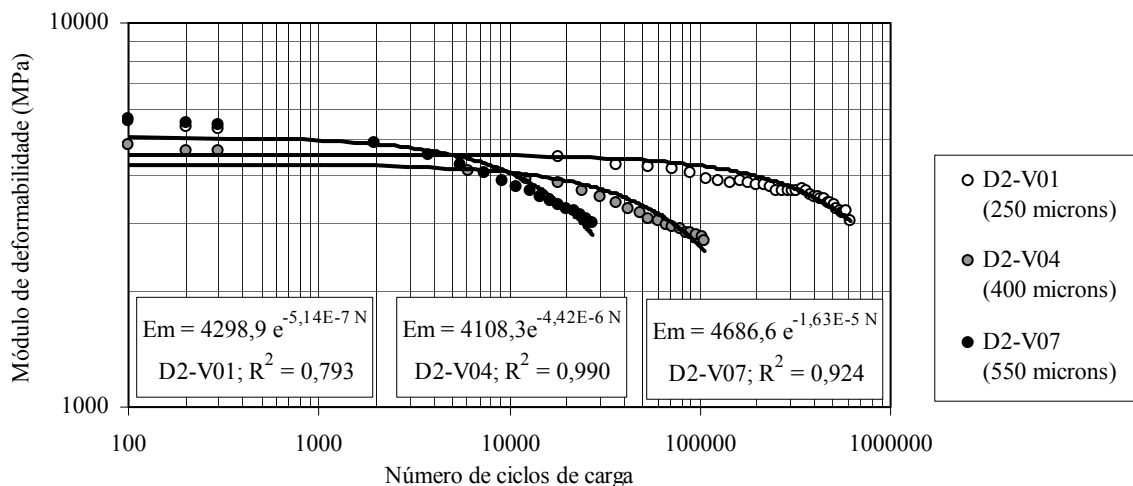


Figura 5.10 – Exemplos de ajuste dos resultados de ensaios de fadiga a uma lei do tipo

$$E_m = E_0 \times e^{b N}$$

A partir dos parâmetros das equações de ajuste (E_0 , b), relativos a cada ensaio, pode então estimar-se o número de ciclos correspondente a uma determinada redução do módulo de

deformabilidade e estabelecer a lei de fadiga do material, o que constitui uma vantagem relativamente ao método geral. Assim, tendo em conta que o parâmetro E_0 representa o módulo inicial, para uma redução de 50% do módulo de deformabilidade, obtém-se:

$$N = \frac{\ln(0,5)}{b} \tag{5.7}$$

Aplicou-se a metodologia aos resultados da mistura D2, considerando todos os pares de valores registados a partir do ciclo de carga número 100, tendo-se chegado aos resultados indicados no Quadro 5.3 e à correspondente lei de fadiga (Figura 5.11).

Quadro 5.3 – Resumo dos parâmetros admitindo a relação $E_m = E_0 e^{bN}$ e número de ciclos de carga correspondente a redução de 50% do módulo de deformabilidade (mistura D2)

Provete	E_0	b	Número de ciclos
D2-V01	4298,9	$-5,14 \times 10^{-7}$	1348535
D2-V05	4938,1	$-7,70 \times 10^{-7}$	900191
D2-V08	4757,5	$-2,63 \times 10^{-7}$	2635541
D2-V02	4599,7	$-3,52 \times 10^{-6}$	196917
D2-V04	4108,3	$-4,42 \times 10^{-6}$	156821
D2-V09	4897,8	$-3,89 \times 10^{-6}$	178187
D2-V03	3934,5	$-1,36 \times 10^{-5}$	50967
D2-V07	4686,1	$-1,63 \times 10^{-5}$	42524
D2-V10	5153,4	$-2,33 \times 10^{-5}$	29749

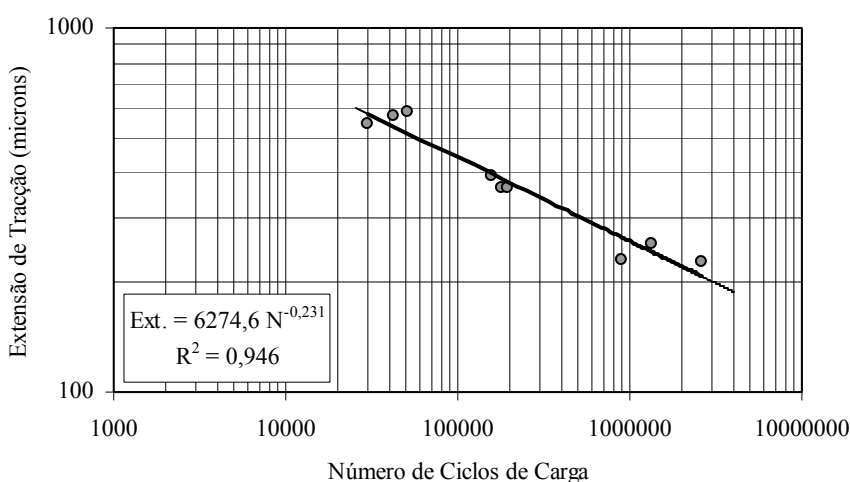


Figura 5.11 – Exemplo de lei de fadiga admitindo lei de ajuste $E_m = E_0 e^{bN}$ (mistura D2)

Nos casos estudados, regra geral, a metodologia conduz a um ajuste satisfatório da lei de fadiga. Contudo as expressões do tipo exponencial podem reproduzir mal a evolução do módulo de deformabilidade e, nomeadamente, conduzir a erros na estimativa do módulo

inicial (Rowe, 2000), podendo assim existir erro significativo na definição do critério de paragem do ensaio. Por isso, deve existir algum cuidado ao utilizar esta metodologia devido à incerteza que a mesma pode incorporar.

- Método da energia dissipada

A energia dissipada em cada ciclo de carga i , por unidade de volume, é dada pela seguinte equação:

$$W_i = \pi \sigma_i \varepsilon_i \sin \phi_i \quad (5.8)$$

onde,

W_i - energia dissipada, por ciclo, por unidade de volume, em J/m^3 ;

σ_i - amplitude da tensão aplicada durante um ciclo de carga i , em Pa;

ε_i - amplitude da extensão induzida durante um ciclo de carga i ;

ϕ_i - ângulo de fase no ciclo i .

A energia dissipada, durante um ciclo de carga, corresponde à área compreendida sob a curva fechada que resulta da representação gráfica da tensão em função da extensão. Na Figura 5.12 apresentam-se exemplos da relação tensão/extensão em diferentes fases de um dos ensaios de fadiga realizados. Os pontos representados obtiveram-se admitindo sinusóides perfeitas de carga e deslocamento e correspondem à média dos valores do ângulo de fase e das amplitudes da tensão e da extensão

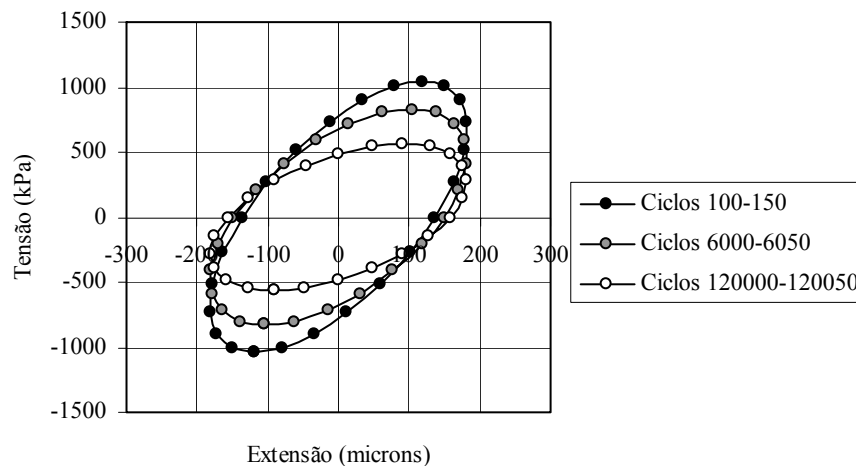


Figura 5.12 – Exemplo de relação tensão/extensão em diferentes ciclos de ensaio de fadiga

Tendo em consideração que nos ensaios de fadiga, realizados com extensão controlada, a amplitude da tensão e o ângulo de fase variam, a energia dissipada acumulada, por unidade de volume, determina-se integrando as funções da tensão e do ângulo de fase ao longo do ensaio.

Na rotura a energia dissipada acumulada designa-se energia dissipada total (W_t). A energia dissipada acumulada até determinado ciclo n , (W_{t_n}), é dada aproximadamente pelo somatório dos valores de energia dissipada (5.8), W_i , calculados ao longo do ensaio:

$$W_{t_n} = \sum_{i=1}^n \pi \sigma_i \varepsilon_i \text{ sen } \phi_i \tag{5.9}$$

Uma abordagem possível, usada por exemplo pela Shell (Van Dijk, 1977), consiste em representar, para o conjunto de ensaios realizados, a relação entre a energia dissipada total, por unidade de volume, W_t , e o número de ciclos necessários até atingir a rotura, N , por uma equação do tipo potência (5.10) e onde os parâmetros a calibrar (c , m) dependem do tipo de mistura.

$$W_t = c N^m \tag{5.10}$$

A título de exemplo representa-se na Figura 5.13 este tipo de interpretação para a mistura D2. Este género de abordagem, por si só, não permite fazer uma leitura clássica dos resultados dos ensaios em termos de fadiga, ou seja, relacionar a extensão com o número de aplicações de carga até à ruína.

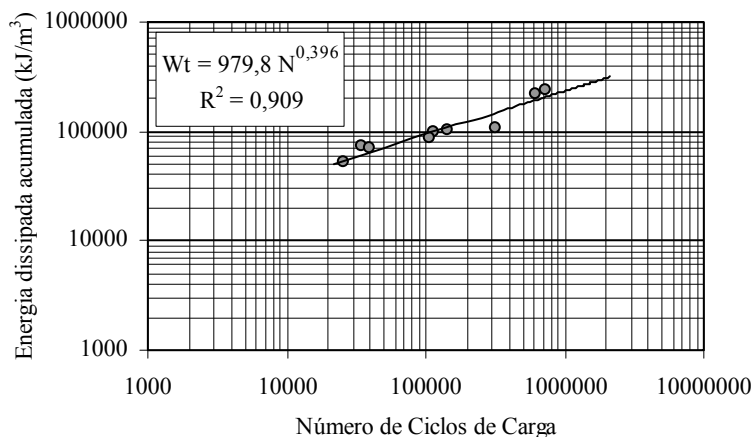


Figura 5.13 – Exemplo de relação entre a energia dissipada, por unidade de volume, e o número de ciclos de carga em ensaio de fadiga (mistura D2)

Porém, pode representar-se graficamente juntamente com a lei de fadiga obtida pelo método geral (Figura 5.14). Como se vê na figura, onde se omitem as linhas de grelha para facilitar a leitura, pode determinar-se a extensão e a energia dissipada total, correspondentes a um determinado número de aplicações de carga, N .

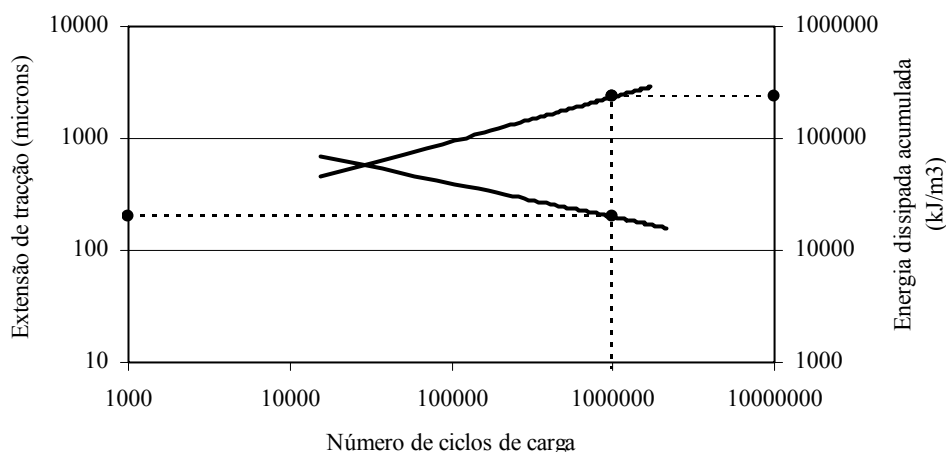


Figura 5.14 – Exemplo de relação entre a energia dissipada, por unidade de volume, e o número de ciclos de carga de ensaio de fadiga (mistura D2)

Pretende estabelecer-se uma lei que relacione a extensão com o número de ciclos de carga com base na evolução da energia dissipada. Ora, a energia dissipada mantém-se relativamente constante até à fase em que se começam a formar microfendas no provete, sendo que a partir daí se verifica uma variação (redução) mais rápida da energia dissipada. Recorrendo ao conceito de energia dissipada, admite-se que neste ponto de transição se inicia o fendilhamento, sendo por essa razão tomado como número admissível de carregamento da mistura.

A localização desse ponto é feita calculando a energia dissipada acumulada ao longo do ensaio, existindo vários métodos para identificar esse ponto de fronteira (Capitão, 2003). Porém, não foi possível aplicar essas metodologias aos resultados a que se chegou, o que terá ficado a dever-se à imposição de final do ensaio para 50% de redução do módulo de deformabilidade, situando-se o ponto de transição para além dos registos do ensaio.

- Método da energia dissipada adaptado

A partir da análise dos resultados obtidos seguiu-se uma metodologia que se baseia em determinadas aproximações. Na Figura 5.15 pode observar-se um exemplo típico de evolução da energia dissipada acumulada em ensaio de fadiga.

Constata-se que, ao longo dos ensaios, a energia dissipada acumulada (Wt) se relaciona com o número de ciclos de carga (N), de forma muito aproximada, através de uma equação do 2.º grau que passa na origem (5.11).

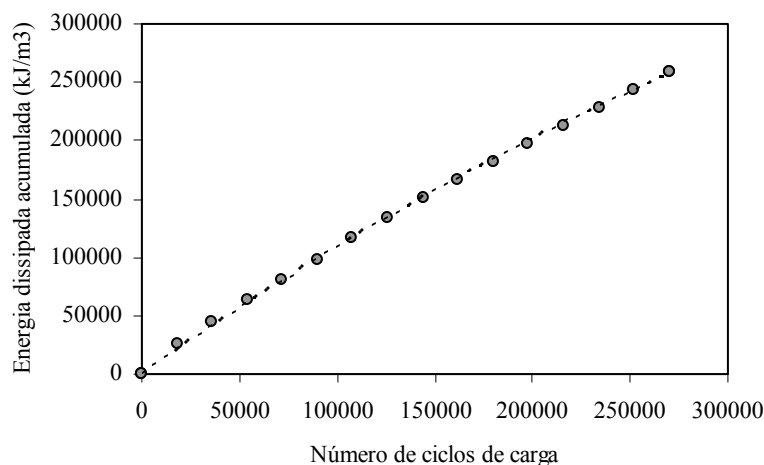


Figura 5.15 – Exemplo de evolução da energia dissipada acumulada com o número de ciclos de carga (provetes R1-V07)

$$Wt = K_1 N + K_2 N^2 \tag{5.11}$$

Recordando a definição de energia dissipada, dividindo e multiplicando a expressão (5.8) por ϵ_i , aquela equação simplifica-se para:

$$W_i = \pi E m_i (\epsilon_i)^2 \text{sen } \phi_i = \pi (\epsilon_i)^2 E_{2i} \tag{5.12}$$

Ou seja, a energia dissipada em cada ciclo, por unidade de volume, é proporcional à parte imaginária do módulo complexo (ou módulo de deformabilidade). Mas, para as temperaturas usuais em ensaios de fadiga, apesar do ângulo de fase apresentar alguma variação ao longo do ensaio, o seu seno não varia de forma significativa. Ora, como os restantes parâmetros da equação (5.12) são constantes, incluindo a extensão controlada ao longo do ensaio, pode então dizer-se que a energia dissipada, em cada ciclo, é aproximadamente proporcional ao módulo de deformabilidade da mistura.

$$W_i \approx C E m_i \tag{5.13}$$

A constante de proporcionalidade, C, é dada pela equação (5.14), onde ϕ_{med} representa o valor médio do ângulo de fase ao longo do ensaio e ϵ a extensão de tracção induzida.

$$C = \pi (\epsilon)^2 \text{sen } (\phi_{med}) \tag{5.14}$$

Deste modo, a variação do módulo de deformabilidade será proporcional à variação da energia dissipada acumulada, pelo que se observará uma determinada redução do módulo de deformabilidade (Rm) quando se registar igual variação da inclinação da equação da energia

dissipada acumulada (5.11). Atendendo à noção de derivada, tem-se que a inclinação da equação é dada por (5.15), onde o parâmetro K_1 representa a inclinação na origem.

$$W'_t = K_1 + 2 K_2 N \quad (5.15)$$

Tem-se que a redução do módulo de deformabilidade (R_m) ocorrerá quando a relação entre a diferença de inclinações e a inclinação na origem da curva da energia dissipada acumulada, for dada por:

$$\frac{K_1 - (K_1 + 2 K_2 N)}{K_1} = R_m \quad (5.16)$$

ou seja,

$$N = -\frac{K_1 R_m}{2 K_2} \quad (5.17)$$

Por exemplo, para uma redução de 50% do módulo de deformabilidade ($R_m = 0,5$), tem-se:

$$N = -\frac{K_1}{4 K_2} \quad (5.18)$$

Obtidos os parâmetros K_1 e K_2 da curva de ajuste a cada ensaio realizado, pode assim estimar-se a vida à fadiga correspondente a determinada redução do módulo. Na Figura 5.16 exemplifica-se graficamente o processo descrito, num caso de 50% de redução do módulo de deformabilidade. Refira-se que o método apresentado, não esquecendo as simplificações que incorpora, apresenta a vantagem de poder estimar leis de fadiga para reduções do módulo de deformabilidade diferentes da considerada.

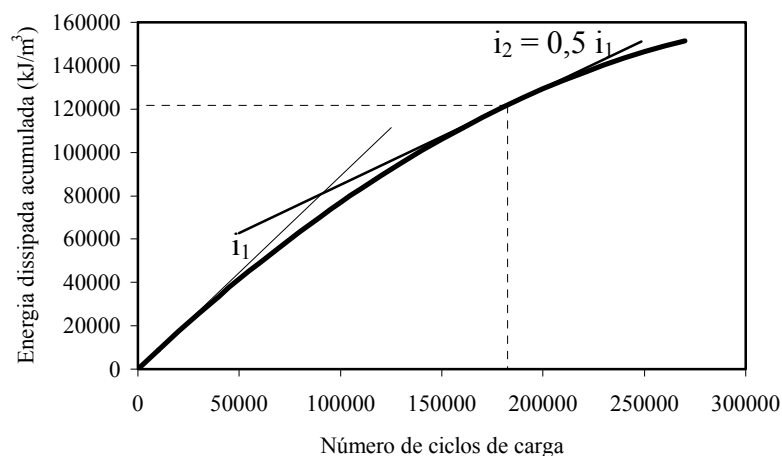


Figura 5.16 – Representação gráfica da aplicação do método da energia dissipada adaptado

Aplicou-se a metodologia descrita aos resultados da mistura D2, considerando reduções de 30%, 50% e 70%, tendo-se chegado aos valores indicados no Quadro 5.4 e às correspondentes leis de fadiga representadas na Figura 5.17. Com o objectivo de validar esta metodologia, na análise dos resultados dos ensaios de fadiga de cada grupo de misturas (MBTE, MBLB e BDLB) comparam-se os resultados obtidos pelo método geral e pelo método da energia dissipada adaptado.

Quadro 5.4 – Resumo da aplicação do método da energia dissipada adaptado, aos resultados da mistura D2, para reduções do módulo de deformabilidade de 30%, 50% e 70%

Proverte	K_1	K_2	N (Rm=30%)	N (Rm=50%)	N (Rm=70%)
D2-V01	463,2	$-1,66 \times 10^{-4}$	418554	697590	976627
D2-V05	464,0	$-4,18 \times 10^{-4}$	166507	277512	388517
D2-V08	407,2	$-1,18 \times 10^{-4}$	517627	862712	1207797
D2-V02	890,3	$-1,22 \times 10^{-3}$	109463	182439	255414
D2-V04	1142,6	$-3,03 \times 10^{-3}$	56564	94274	131983
D2-V09	1313,1	$-4,18 \times 10^{-3}$	47121	78535	109949
D2-V03	2233,6	$-1,15 \times 10^{-2}$	29134	48557	67979
D2-V07	2686,8	$-1,74 \times 10^{-2}$	23162	38603	54045
D2-V10	2841,4	$-3,29 \times 10^{-2}$	12955	21591	30228

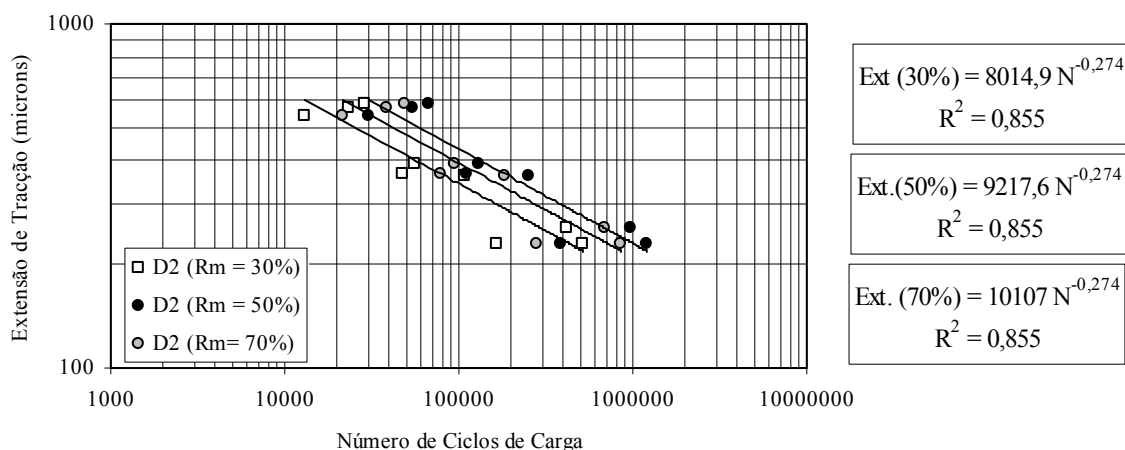


Figura 5.17 – Leis de fadiga da mistura D2, obtidas por aplicação do método da energia dissipada adaptado

- Método adoptado

Por fim, representam-se as leis de fadiga obtidas pelo método geral, pelo geral adaptado e pelo método da energia dissipada adaptado, todos para uma redução de 50% do módulo de deformabilidade (Figura 5.18). Como se verá, verifica-se que, no exemplo anterior e noutros casos analisados, o método geral e o método da energia dissipada adaptado conduzem a resultados muito idênticos. O mesmo não se pode dizer do método geral adaptado, que estima

uma vida à fadiga muito superior aos outros dois processos, e que se ficará a dever à subavaliação do módulo inicial. Entre o método geral e o método da energia dissipada adaptado, escolheu-se o método geral na análise de resultados por ser o habitualmente usado.

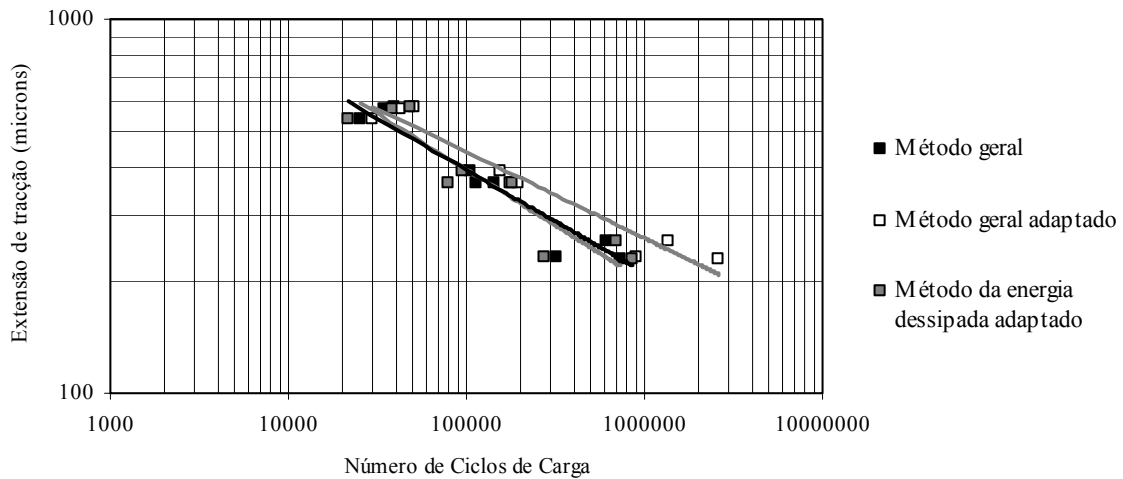


Figura 5.18 – Leis de fadiga da mistura D2, obtidas pelo método geral, pelo método geral adaptado e pelo método da energia dissipada adaptado

5.2.3 Ensaios de avaliação da resistência à deformação permanente

- Ensaios de compressão uniaxial de cargas repetidas

Neste ensaio obtém-se uma curva de deformação que relaciona a deformação axial permanente ocorrida no provete com o número de ciclos de carga. As curvas de deformação obtidas para o ensaio de compressão uniaxial, com aplicação de cargas repetidas, têm um andamento do tipo indicado na Figura 5.19.

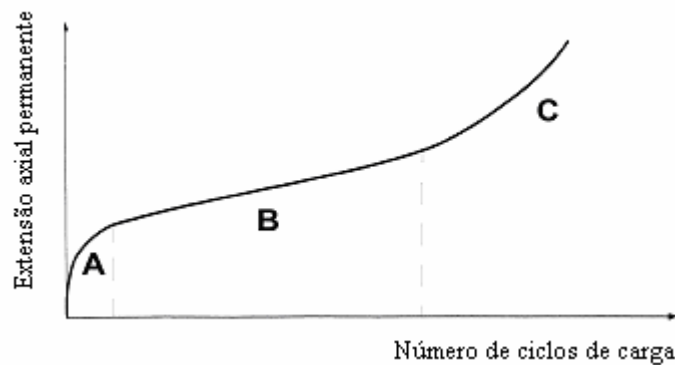


Figura 5.19 – Evolução típica em ensaio de compressão uniaxial de cargas repetidas (adaptado de CEN, 2005)

Normalmente, identificam-se na curva três fases distintas (CEN, 2005). Na primeira (fase A) a deformação em cada ciclo baixa fortemente, pelo que a inclinação da curva de deformação, nesta fase, decresce rapidamente com a aplicação das cargas. Esta fase não linear deve-se essencialmente ao adensamento da mistura. Segue-se a segunda fase (fase B), que se utiliza para caracterizar o material e onde a curva assume um traçado quase linear. Finalmente, a terceira fase (fase C), a qual nem sempre ocorre nos ensaios e onde a deformação em cada ciclo aumenta rapidamente, com os sucessivos ciclos de carga, aumentando a inclinação da curva. É nesta fase que se registam as grandes deformações no provete e o seu fendilhamento.

De acordo com a norma (EN 12697-25) devem determinar-se os seguintes parâmetros: a extensão axial permanente, a velocidade de deformação e o módulo de fluência. Apesar de a norma não o indicar determinou-se ainda o módulo resiliente. A extensão axial permanente (ou acumulada), ε_N , que se irá expressar em microns, embora a norma indique percentagem, relaciona a deformação permanente no ciclo N com a altura inicial do provete:

$$\varepsilon_N = \frac{\Delta h_N}{h_0} = \frac{h_0 - h_N}{h_0} \quad (5.19)$$

onde,

h_0 - altura inicial do provete (mm);

h_N - altura do provete no ciclo N (mm);

Δh_N - deformação axial do provete no ciclo N (mm).

Na Figura 5.20 mostra-se um exemplo de evolução da extensão axial permanente ao longo de um ensaio de compressão uniaxial de cargas repetidas. Irá ainda usar-se a extensão axial permanente no final do ensaio, ε_{3600} .

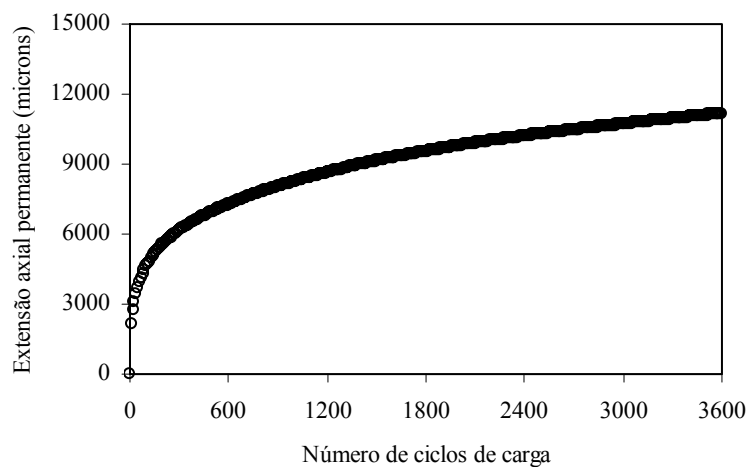


Figura 5.20 – Evolução da extensão axial permanente ao longo de ensaio de compressão uniaxial de cargas repetidas (provete B2-C07)

A velocidade de deformação (Vdef), em microns/ciclo, corresponde à inclinação da curva na fase linear, sendo dada pela equação (5.20) onde ε_{N_1} e ε_{N_2} representam a extensão axial permanente nos ciclos N_1 e N_2 respectivamente.

$$V_{def} = \frac{\varepsilon_{N_1} - \varepsilon_{N_2}}{N_1 - N_2} \quad (5.20)$$

Na análise de resultados obteve-se a velocidade de deformação por regressão linear dos valores medidos entre os ciclos 2000 e 3600, isto porque a terceira fase nunca foi atingida nos ensaios realizados.

A curva de deformação permanente apresenta um andamento idêntico ao de um ensaio de fluência. Assim, embora na realidade não se trate de um ensaio de fluência, usa-se o conceito de módulo de fluência (*Creep modulus* na norma) em determinado ciclo, S_N , e que corresponde ao quociente entre a tensão máxima aplicada (σ) e a deformação permanente no ciclo N (5.21).

$$S_N = \frac{\sigma}{\varepsilon_N} \quad (5.21)$$

De acordo com a norma, o módulo de fluência, se expresso em kPa, deverá ser apresentado arredondado à centena, pelo que sendo expresso em MPa deve ser arredondado com precisão ao décimo de MPa. No que respeita à média dos resultados, nada é dito como deve ser calculada. Admita-se que se pretende calcular o módulo de fluência dispondo da extensão axial permanente medida em três provetes (ε_{N_1} , ε_{N_2} e ε_{N_3}) e dos correspondentes valores do módulo de fluência (S_{N_1} , S_{N_2} e S_{N_3}). A extensão média será dada pela média aritmética dos valores medidos:

$$\varepsilon_N = \frac{\varepsilon_{N_1} + \varepsilon_{N_2} + \varepsilon_{N_3}}{3} \quad (5.22)$$

Poderá então calcular-se o valor de S_N usando a equação (5.21). Contudo, também se pode calcular S_N a partir dos valores obtidos nos diferentes ensaios. Substituindo (5.22) em (5.21), obtém-se:

$$S_N = \frac{\sigma}{\frac{\varepsilon_{N_1} + \varepsilon_{N_2} + \varepsilon_{N_3}}{3}} = \frac{3}{\frac{\varepsilon_{N_1}}{\sigma} + \frac{\varepsilon_{N_2}}{\sigma} + \frac{\varepsilon_{N_3}}{\sigma}} \quad (5.23)$$

que é o mesmo que:

$$S_N = \frac{3}{\frac{1}{S_{N1}} + \frac{1}{S_{N2}} + \frac{1}{S_{N3}}} \quad (5.24)$$

Só nos casos em que os valores parciais do módulo de fluência são muito próximos, com coeficiente de variação inferior a 5%, é que a expressão (5.24) conduz a valor próximo da média aritmética simples, o que nem sempre acontece realizando três ensaios. Por isso, deve recorrer-se à equação (5.24) ou calcular o módulo de fluência correspondente à média da extensão axial permanente.

Considerou-se uma tensão de compressão máxima de 150 kPa e tomou-se como referência o módulo de fluência no final do ensaio. Ora, como a tensão é constante, S_N é proporcional ao inverso da extensão axial permanente, pelo que conduzirá à mesma hierarquização das misturas. Por essa razão, embora se apresentem os resultados de S_N , a análise dos resultados irá centrar-se essencialmente em termos de extensão axial permanente e velocidade de deformação.

O módulo resiliente em determinado ciclo, Er_N , normalmente expresso em MPa, corresponde ao quociente entre a tensão axial máxima aplicada, σ , e a extensão recuperada ou elástica medida nesse ciclo, ϵ_{rN} .

$$Er_N = \frac{\sigma}{\epsilon_{rN}} \quad (5.25)$$

Para misturas betuminosas e nas condições de ensaio correntes, o módulo resiliente é próximo do valor do módulo de deformabilidade, pois a extensão recuperada é normalmente muito superior à permanente ocorrida num ciclo de carga.

O que se disse para o módulo de fluência também aqui é válido. Atendendo à equação de definição, no caso de três ensaios, o módulo resiliente final representativo é dado pela equação seguinte.

$$Er = \frac{3}{\frac{1}{Er_1} + \frac{1}{Er_2} + \frac{1}{Er_3}} \quad (5.26)$$

Como exemplo, representa-se na Figura 5.21 a evolução do módulo de fluência e do módulo resiliente ao longo de ensaio de compressão uniaxial de cargas repetidas relativo a um provete da mistura B2. O módulo de fluência apresenta uma evolução inversa da extensão axial permanente, resultante da sua própria definição. O módulo resiliente assume ao longo do ensaio um valor praticamente constante.

Também se recorre ao número de ciclos de carga até à rotura do provete. Todavia, como se referiu, nunca se atingiu a fase de rotura do provete, pelo que não se recorreu a este parâmetro. A norma indica ainda que se deve terminar o ensaio sempre que ocorra uma extensão axial permanente superior a 40000 microns, o que de facto aconteceu esporadicamente em provetes com percentagem de betume alta e porosidade baixa. Nesta situação, seguindo a norma, prolongou-se a parte quase linear da curva (fase B) até aos 3600 ciclos, obtendo-se o valor da extensão total no ensaio.

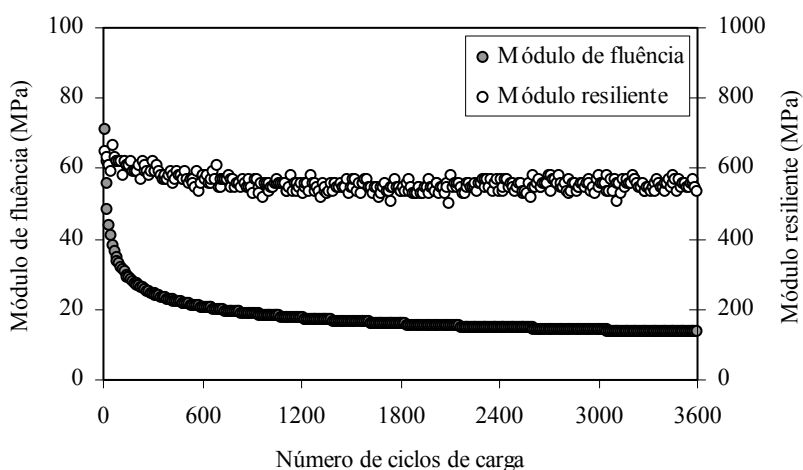


Figura 5.21 – Evolução do módulo de fluência e do módulo resiliente em ensaio de compressão uniaxial de cargas repetidas (provetes B2-C07)

- Ensaio de compressão triaxial de cargas repetidas

Os ensaios foram realizados nas condições já definidas no Capítulo 4. Tal como no ensaio de compressão uniaxial de cargas repetidas, o resultado é uma curva que relaciona a deformação axial do provete com o número de ciclos de carga. A extensão axial permanente e a velocidade de deformação (ϵ_N e V_{def}), usadas nos ensaios de compressão uniaxial, são também indicadas na EN 12697-25 (método B) para os ensaios triaxiais. A norma não especifica a utilização de qualquer módulo, no entanto, foram também determinados os valores do módulo de fluência e do módulo resiliente.

No que respeita às unidades, tal como nos ensaios de compressão uniaxial, optou-se por expressar a extensão axial permanente em microns, a velocidade de deformação em microns/ciclo e os módulos de fluência e resiliente em MPa. Na norma é indicada metodologia idêntica à descrita para os ensaios de compressão uniaxial e é definido ainda outro processo de interpretação, em que os parâmetros dependem do ajuste dos resultados obtidos, na parte quase linear, a uma curva do tipo da equação (5.27).

$$\varepsilon_N = A N^B \quad (5.27)$$

Além dos parâmetros A e B, usa-se ainda a extensão permanente ao fim de 1000 ciclos, $\varepsilon_{1000,calc}$, estimada pela equação de ajuste:

$$\varepsilon_{1000,calc} = A \times 1000^B \quad (5.28)$$

Fazendo o ajuste apenas na parte quase linear (fase B) verificou-se que tal conduzia a estimativas do parâmetro $\varepsilon_{1000,calc}$ muito diferentes dos valores observados. Por outro lado, verificou-se um bom ajuste da lei ao longo de todo o ensaio, pelo que se seguiu o mesmo procedimento de Gardete (2005), procedendo ao ajuste usando todos os resultados obtidos (Figura 5.22).

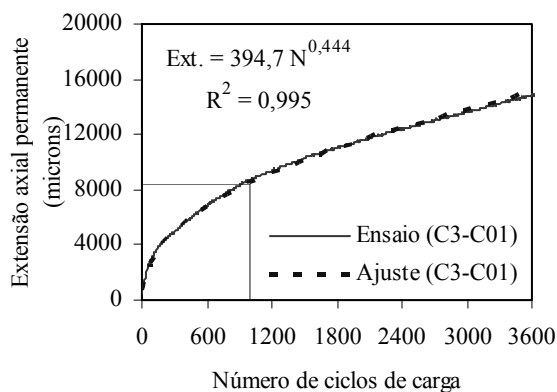


Figura 5.22 – Exemplo de ajuste à evolução da extensão axial permanente em ensaios de compressão triaxial de cargas repetidas (provete C3-C01)

A equação de ajuste representada em escala logarítmica corresponde a uma “recta” cuja inclinação é o parâmetro B, que em conjunto com $\varepsilon_{1000,calc}$, pode ser usado para caracterizar a mistura betuminosa à deformação permanente (CEN, 2005). Realizaram-se dois ensaios por mistura e tomaram-se como representativos os parâmetros da curva média. Isto porque, tratando-se de ajuste não linear, a média aritmética dos parâmetros não corresponde aos parâmetros da curva média. Tal poderia ser feito, de forma aproximada, apenas para o parâmetro B, mas não para os parâmetros A e $\varepsilon_{1000,calc}$.

O módulo resiliente foi determinado automaticamente pelo *software* do equipamento. Os valores finais representam a média, dos valores obtidos entre o ciclo 2000 e 3600, determinada de acordo com a equação (5.29) mas com dois valores apenas. Refira-se ainda que, apesar da norma não o indicar, também se utilizou a metodologia com base no ajuste não linear da curva de deformação permanente na interpretação dos resultados dos ensaios de compressão uniaxial.

- Ensaio com simulador de tráfego

No ensaio com simulador de tráfego, ou *Wheel Tracking*, obtém-se uma curva que relaciona a deformação permanente do provete com o tempo. Como o equipamento efectua 21 ciclos por minuto, correspondendo cada ciclo a duas passagens da roda, pode fazer-se uma representação idêntica às dos ensaios de compressão (uniaxiais e triaxiais) relacionando a deformação permanente com o número de ciclos de carga. No entanto a EN 12697-22 sugere que os resultados sejam analisados em função do tempo. Na Figura 5.23 representa-se um exemplo de curva de deformação obtida em um dos ensaios realizados. À luz da norma podem considerar-se dois parâmetros na análise dos resultados da curva: a deformação permanente total, ou cavado de rodeira, e a velocidade média de deformação.

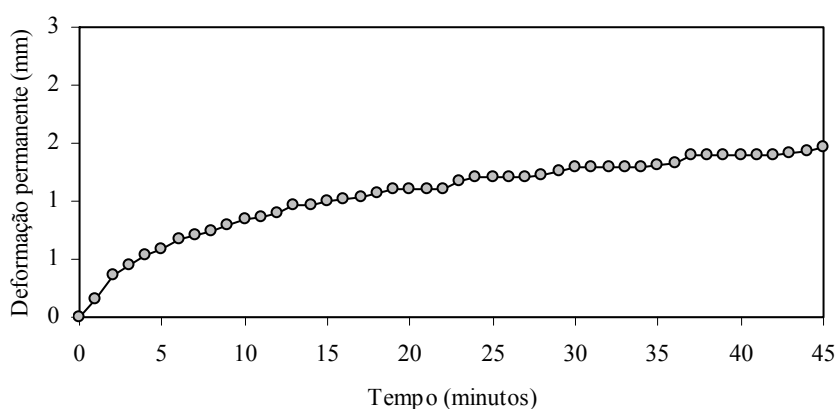


Figura 5.23 – Exemplo de curva de deformação obtida com simulador de tráfego

A profundidade média de rodeira, R_D , corresponde à profundidade média da rodeira no final do ensaio e é expressa em milímetros. A velocidade de deformação, V_{def} ⁴, em mm/h, define-se pela seguinte equação (5.29), onde r_n representa a última deformação vertical medida (mm) e r_{n-i} a deformação vertical medida no instante n-i (mm).

$$V_{def} = 3,6 \times (r_n - r_{n-3}) + 1,2 \times (r_{n-1} - r_{n-2}) \quad (5.29)$$

A expressão (5.29) é apresentada para o caso de os valores de deformação serem medidos com intervalos de 5 minutos. Contudo, o *software* de controlo do equipamento faz a aquisição em cada minuto, o que permite estabelecer uma regressão linear das deformações medidas nos últimos 15 minutos de ensaio, na parte quase linear da curva. A norma indica ainda, como parâmetro de caracterização à deformação permanente, a velocidade de deformação média WTR, definida a partir da velocidade de deformação:

$$WTR = 14 V_{def} \frac{W}{L} \quad (5.30)$$

⁴ Não se usou a simbologia da norma, TR, pelo facto de neste trabalho a mesma já simbolizar taxa de reciclagem.

onde,

WTR – velocidade média de deformação (mm/h);

w – largura do pneu (mm);

L – peso aplicado pela roda (N).

Para as condições do equipamento, w e L são constantes (w = 50 mm e L = 700 N), pelo que esta velocidade, acaba por ser proporcional à velocidade de deformação. Em termos de análise dos resultados, nada acrescenta visto que é proporcional à velocidade de deformação. Assim, a análise de resultados será feita sobretudo com base nos valores da deformação total e da velocidade de deformação.

5.3 Apresentação e Análise dos Resultados das Misturas MBTE

5.3.1 Módulos de deformabilidade e ângulos de fase

Os valores do módulo de deformabilidade e do ângulo de fase das misturas MBTE⁵, obtidos nos ensaios de flexão de cargas repetidas nas condições de ensaio antes descritas, sintetizam-se nos Quadros 5.5, 5.6 e 5.7, respectivamente para as temperaturas de 15°C, 25°C e 40°C. No Anexo I podem consultar-se os resultados mais detalhados, provete a provete, para as 12 misturas aplicadas nos trechos experimentais.

Quadro 5.5 – Módulos de deformabilidade e ângulos de fase das misturas MBTE, medidos a 15°C

Mistura	Módulo de Deformabilidade (MPa)			Ângulo de Fase (graus)		
	10 Hz	5 Hz	1 Hz	10 Hz	5 Hz	1 Hz
A1	8178	7471	6125	10,8	12,2	13,8
A2	8930	8125	6052	12,7	14,1	15,3
A3	8867	8081	6232	14,0	14,9	16,8
B1	9072	8511	6712	10,6	11,8	12,6
B2	9307	8618	6910	12,4	13,5	14,9
B3	8869	8351	6231	13,7	15,0	17,0
C1	9069	8522	6788	11,2	11,2	12,8
C2	8668	7949	5926	12,2	12,7	13,0
C3	9383	8844	6431	13,1	14,4	16,7
D1	9187	8666	6624	11,8	11,3	13,3
D2	9297	8639	6536	11,3	12,2	13,0
D3	9013	8300	5843	14,2	15,0	17,1

⁵ Macadame betuminoso aplicado nos trechos experimentais, conforme designação adoptada no Capítulo 4 (Quadro 4.10, página 114).

Quadro 5.6 – Módulos de deformabilidade e ângulos de fase das misturas MBTE, medidos a 25°C

Mistura	Módulo de Deformabilidade (MPa)			Ângulo de Fase (graus)		
	10 Hz	5 Hz	1 Hz	10 Hz	5 Hz	1 Hz
A1	6033	5134	3282	22,7	25,3	28,5
A2	5925	4931	3213	24,4	27,5	29,6
A3	5834	4868	2956	25,9	28,7	31,5
B1	6081	5193	3280	22,2	24,5	27,6
B2	6086	5322	3513	23,5	26,2	28,6
B3	5644	4796	2976	23,9	26,1	29,2
C1	6148	5287	3487	23,4	25,4	27,2
C2	5926	4915	3223	22,3	24,5	25,3
C3	5881	4964	3025	25,6	28,7	30,1
D1	6568	5654	3523	22,3	23,9	26,4
D2	6241	5445	3404	20,5	23,0	25,5
D3	5356	4510	2837	25,1	27,2	30,2

Quadro 5.7– Módulos de deformabilidade e ângulos de fase das misturas MBTE, medidos a 40°C

Mistura	Módulo de Deformabilidade (MPa)			Ângulo de Fase (graus)		
	10 Hz	5 Hz	1 Hz	10 Hz	5 Hz	1 Hz
A1	2321	1844	1180	38,7	37,0	29,7
A2	2026	1600	983	40,4	39,9	31,8
A3	1863	1403	817	40,7	39,3	29,9
B1	2586	1939	1132	37,3	38,1	31,9
B2	2198	1645	975	39,1	39,0	32,7
B3	2011	1492	883	40,0	39,2	32,2
C1	2732	2049	1141	35,6	36,0	30,2
C2	2283	1751	1044	37,3	38,6	33,4
C3	2021	1550	882	40,5	41,7	34,7
D1	2757	2117	1239	36,1	36,8	31,4
D2	2467	1891	1110	36,7	36,6	31,0
D3	1935	1453	861	39,4	40,6	35,8

- Influência da taxa de reciclagem e da percentagem de betume

Verifica-se que o módulo de deformabilidade das misturas em análise (Figura 5.24) não varia de forma significativa, assumindo a 25°C e 10 Hz, valores da ordem dos 6000 MPa. O mesmo se pode dizer em termos de variação para os módulos de deformabilidade a 40°C e a 15°C, apesar de serem valores diferentes. Regista-se assim que, neste aspecto, as misturas recicladas exibem um comportamento idêntico ao das misturas de referência (A1, A2 e A3).

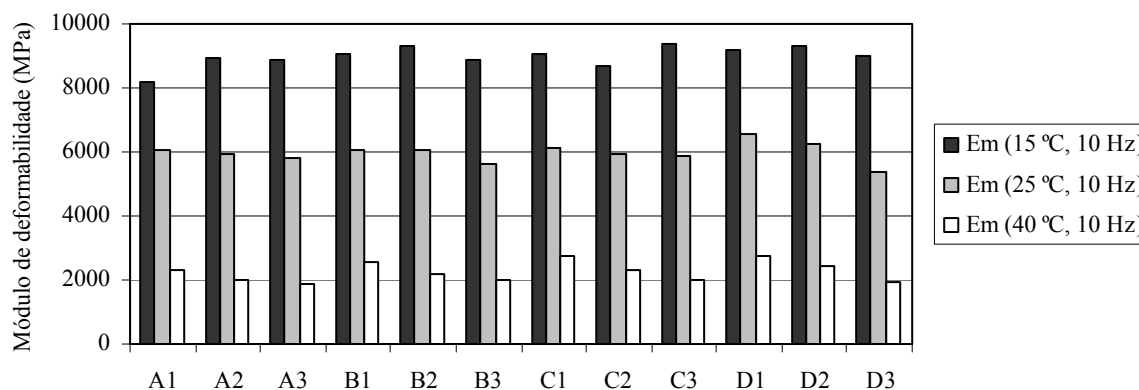


Figura 5.24 – Representação gráfica do módulo de deformabilidade das misturas aplicadas nos trechos experimentais (frequência de 10 Hz)

Como o ligante final é mais duro nas misturas recicladas, seria expectável que o módulo de deformabilidade das misturas recicladas aumentasse de forma mais significativa com a taxa de reciclagem. Contudo, os resultados não vieram confirmar tal expectativa. Julga-se que a tendência de aumento do módulo de deformabilidade com a taxa de reciclagem foi mitigada pelo uso dum betume de adição mais viscoso e por, eventualmente, não ter havido um bom entrosamento final. Quanto a este aspecto, como se verá adiante, nas misturas recicladas produzidas e compactadas em laboratório, onde se aqueceu o material fresado e se registaram temperaturas de mistura e compactação mais elevadas, já se verificaram maiores aumentos de módulo.

Fazendo uma análise, para igual taxa de reciclagem, regista-se, principalmente a 25°C e a 40°C, uma redução do módulo das misturas com o aumento da percentagem de betume das misturas e que é mais visível nas misturas recicladas com incorporação de material fresado de 30% (misturas Ci) e de 40% (misturas Di).

- Influência das condições de ensaio

Centre-se agora a análise no estudo da influência das condições de ensaio, frequência e temperatura, nos valores do módulo de deformabilidade. Na Figura 5.25 podem ver-se as envolventes das curvas isócronas traçadas a partir de todos os resultados obtidos a 10Hz.

O betume asfáltico é um ligante com elevada susceptibilidade térmica, o que leva a que as misturas betuminosas apresentem um comportamento muito dependente da temperatura. Por essa razão, os valores medidos mostram a redução do módulo de deformabilidade e o aumento do ângulo de fase, com o aumento da temperatura.

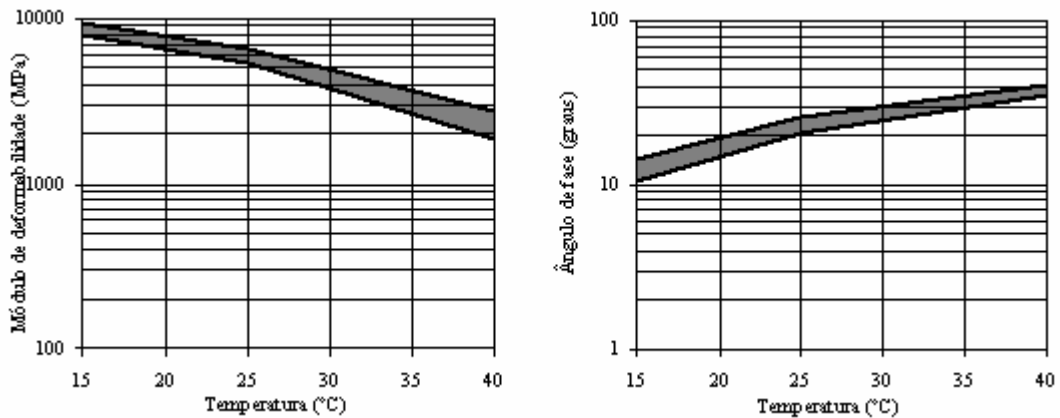


Figura 5.25 – Representação gráfica das envolventes das curvas isócronas dos módulos de deformabilidade e dos ângulos de fase, a 10 Hz, das misturas dos trechos experimentais

Na Figura 5.26 podem ver-se as envolventes das curvas isotérmicas traçadas a partir de todos os resultados. Observando a figura, confirma-se que o módulo de deformabilidade cresce à medida que a frequência de carregamento aumenta e, regra geral, o ângulo de fase diminui com a frequência, excepto para 40°C, em que aumenta ligeiramente. No Quadro 5.8 indica-se a média dos valores medidos e os respectivos desvios padrões e coeficientes de variação.

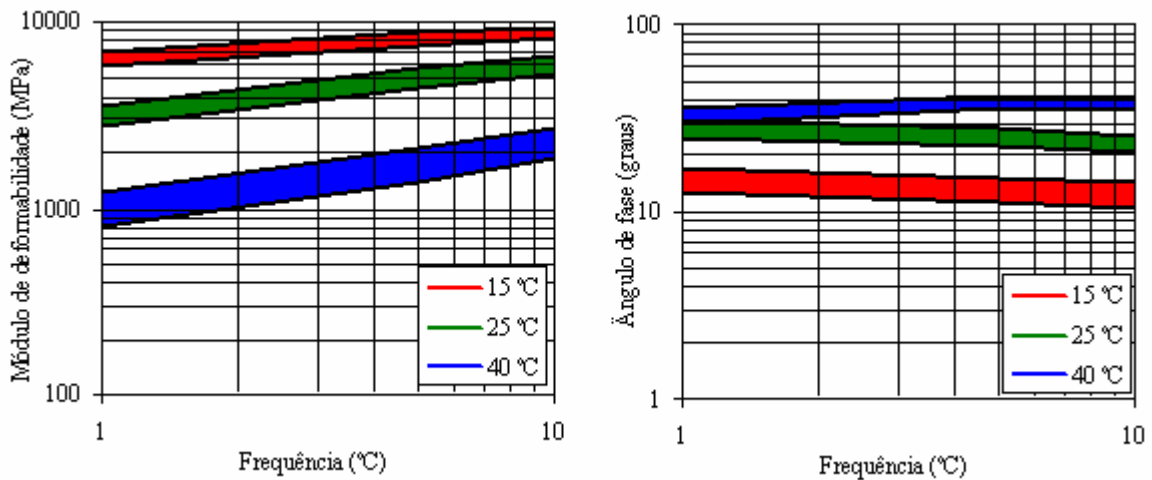


Figura 5.26 – Envolventes das curvas isotérmicas dos módulos de deformabilidade e dos ângulos de fase, das misturas dos trechos experimentais

Estudou-se ainda a influência das condições de ensaio isoladamente e no global. No que toca à frequência de ensaio, tomou-se como referência a frequência de 10 Hz e interpretaram-se os resultados, comparando os módulos medidos a 5 Hz (Em_5) e a 1 Hz (Em_1), com o módulo de deformabilidade medido a 10 Hz (Em_{10}). Na Figura 5.27 representam-se os conjuntos de valores medidos nos 108 ensaios (12 misturas, 3 temperaturas, 3 provetes/temperatura) com as misturas MBTE. Indicam-se ainda as respectivas leis de ajuste do tipo $Em = A (Em_{10})^B$.

Quadro 5.8 – Resumo da média, desvios padrões e coeficientes de variação (%), dos módulos de deformabilidade e dos ângulos de fase de todas as misturas MBTE

Frequência	Parâmetro	Módulo de Deformabilidade (MPa)			Ângulo de Fase (graus)		
		15°C	25°C	40°C	15°C	25°C	40°C
10 Hz	média	8987	5977	2267	12,3	23,5	38,5
	desvio padrão	330	302	311	1,2	1,6	1,8
	coef. variação (%)	3,7	5,1	13,7	9,8	6,8	4,7
5 Hz	média	8340	5085	1728	13,2	25,9	38,6
	desvio padrão	383	315	240	1,5	1,8	1,7
	coef. variação (%)	4,6	6,2	13,9	11,4	6,9	4,4
1 Hz	média	6368	3226,6	1021	14,7	28,3	32,1
	desvio padrão	351	234	141	1,8	2,0	1,9
	coef. variação (%)	5,5	7,3	13,8	12,2	7,1	5,9

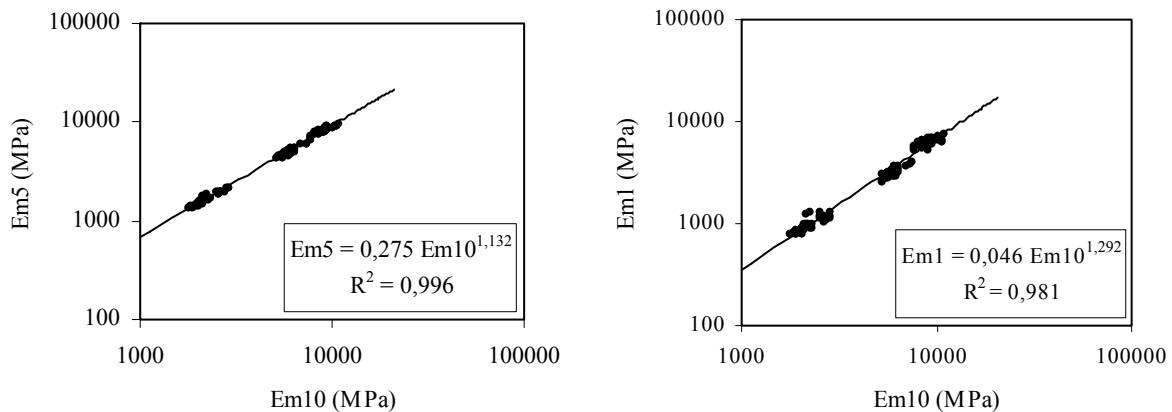


Figura 5.27 – Relação entre os módulos de deformabilidade das misturas MBTE a 5 Hz (Em5) e a 1 Hz (Em1) e o módulo de deformabilidade a 10 Hz (Em10)

Em face dos resultados, conclui-se que as relações entre Em5 e Em10 e entre Em1 e Em10, conduzem a ajustes muito satisfatórios e independentes da temperatura de ensaio e da composição da mistura. Poderá assim estimar-se Em5 e Em1 a partir do módulo de deformabilidade a 10 Hz (Em10). Para demonstrar a qualidade dos ajustes, mostra-se na Figura 5.28 a relação entre os módulos medidos e os estimados nos dois casos. Verifica-se que os valores estimados encaixam na banda de mais ou menos 25%, indicadas na figura.

Fez-se a mesma análise em termos de temperatura tomando como referência o módulo de deformabilidade obtido a 25°C (Em25). Interpretaram-se os resultados, comparando os módulos medidos a 15°C (Em15) e a 40°C (Em40), com o módulo de deformabilidade obtido à temperatura de referência. Na Figura 5.27 representam-se os pares de valores médios (12 misturas e 3 frequências de ensaio) e ainda as respectivas leis de ajuste.

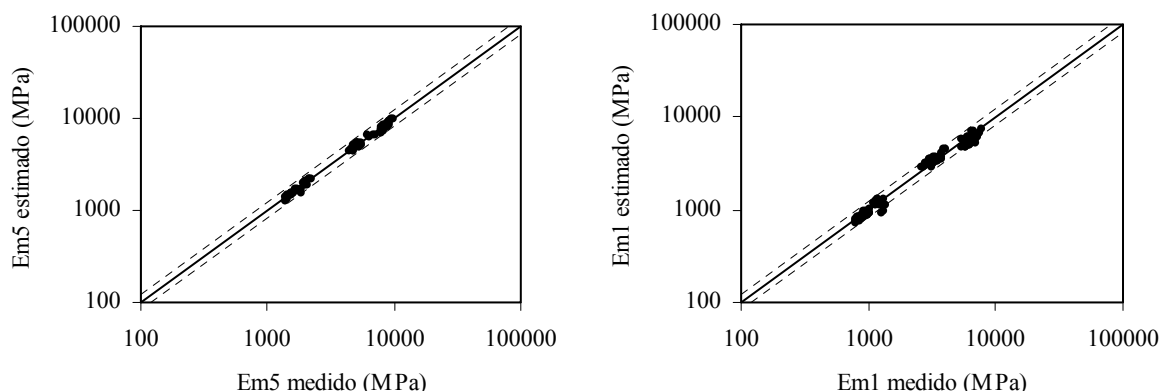


Figura 5.28 – Relação entre os valores medidos e os estimados para os módulos de deformabilidade das misturas MBTE a 5 Hz (Em5) e a 1 Hz (Em1).

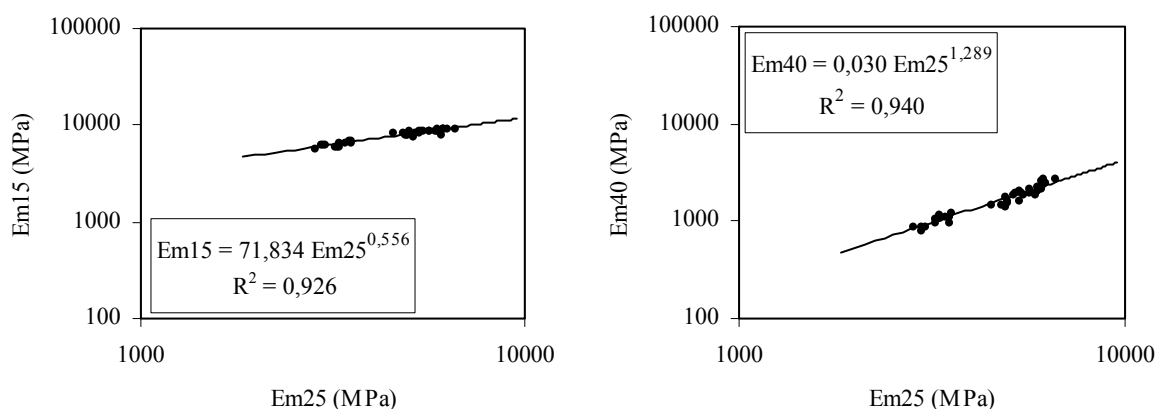


Figura 5.29 – Relação entre os módulos de deformabilidade das misturas MBTE a 15°C (Em15) e a 40°C (Em40) e o módulo de deformabilidade a 25°C (Em25)

Efectuou-se ainda uma análise desagregada por taxa de reciclagem, considerando a influência da frequência (Quadro 5.9) e da temperatura (Quadro 5.10). Pode dizer-se que, nos dois casos, o comportamento das misturas recicladas (trechos B, C e D) e o das misturas de referência (trecho A) é em tudo idêntico, visto que os parâmetros são semelhantes.

Quadro 5.9 – Parâmetros das leis do tipo $Em_i = A (Em_{10})^B$ das misturas MBTE, que relacionam os módulos Em5 e Em1 com o módulo de deformabilidade a 10 Hz (Em10)

Mistura	TR (%)	Parâmetros - Em5			Parâmetros - Em1		
		A	B	R ²	A	B	R ²
A1, A2 e A3	0	0,354	1,102	0,996	0,070	1,247	0,976
B1, B2 e B3	20	0,231	1,153	0,996	0,035	1,328	0,984
C1, C2 e C3	30	0,269	1,135	0,996	0,037	1,317	0,906
D1, D2 e D3	40	0,255	1,141	0,998	0,049	1,284	0,984
Todas as misturas		0,275	1,132	0,996	0,046	1,292	0,981

Quadro 5.10 – Parâmetros das leis do tipo $Em = A (Em25)^B$ das misturas MBTE, que relacionam os módulos Em15 e Em40 com o módulo de deformabilidade a 25°C (Em25)

Mistura	TR (%)	Parâmetros - Em15			Parâmetros - Em40		
		A	B	R ²	A	B	R ²
A1, A2 e A3	0	87,444	0,529	0,912	0,070	1,183	0,925
B1, B2 e B3	20	89,008	0,533	0,993	0,024	1,313	0,929
C1, C2 e C3	30	60,544	0,577	0,919	0,018	1,354	0,952
D1, D2 e D3	40	62,147	0,574	0,957	0,030	1,294	0,981
Todas as misturas		71,834	0,556	0,926	0,030	1,289	0,940

Os resultados, além de confirmarem as tendências antes observadas, evidenciam que se poderá incorporar a influência da temperatura e da frequência num modelo global que permita estimar, para cada mistura, o módulo de deformabilidade em função da temperatura, da frequência (ou tempo de carregamento) e das características das misturas. Estes resultados vêm corroborar trabalhos anteriores realizados com materiais diferentes, nomeadamente com misturas de alto módulo de deformabilidade (Capitão, 2003).

- Relação entre o módulo de deformabilidade e o ângulo de fase

Como se viu, o ângulo de fase, que corresponde ao desfasamento entre as ondas de deslocamento (extensão) e de carga (tensão), permite determinar a parte imaginária e a parte real do módulo complexo ou de deformabilidade.

Nas condições de ensaio adoptadas, verificou-se que a relação entre o módulo de deformabilidade e o ângulo de fase é aproximadamente linear (5.3), pelo que interessaria avaliar esta afinidade entre as duas grandezas considerando todos os pares de valores (Em, ϕ) medidos. No Quadro 5.11 indicam-se, para cada taxa de reciclagem e também no global, nas diferentes frequências de ensaio, os parâmetros da equação linear (5.3). Observaram-se coeficientes de correlação da ordem de 0,95 nas frequências de 10 Hz e 5 Hz, e entre 0,80 a 0,90 na frequência de 1 Hz.

Quadro 5.11 – Parâmetros de ajuste da relação linear entre o módulo de deformabilidade das misturas MBTE e o ângulo de fase

Misturas	10 Hz		5 Hz		1 Hz		10 Hz + 5 Hz	
	A	B	A	B	A	B	A	B
A1, A2 e A3 (TR = 0%)	11573	-235,2	11276	-243,0	9673	-247,7	11439	-239,7
B1, B2 e B3 (TR = 20%)	11982	-251,3	11918	-263,0	10950	-290,9	11962	-257,8
C1, C2 e C3 (TR = 30%)	12066	-255,6	11514	-247,8	9961	-258,3	11817	-252,7
D1, D2 e D3 (TR = 40%)	12301	-266,3	11792	-262,4	10174	-266,5	12071	-265,3
Todas as misturas	11967	-251,3	11627	-254,0	10186	-265,7	11820	-253,6

Representaram-se no Diagrama de *Black* (Figura 5.30) e no diagrama de *Cole-Cole* (Figura 5.31) os valores referentes às duas frequências mais altas. Verifica-se que existe um bom ajuste global entre as duas grandezas, confirmando-se que o módulo de deformabilidade

umenta com a redução do ângulo de fase, e vice-versa. A relação no diagrama de *Black* foi ajustada com base em todos os valores registados nas duas frequências referidas. A representação no diagrama de *Cole-Cole* vem demonstrar que a relação entre a componente elástica (E_1) e a componente visco-elástica (E_2) do módulo de deformabilidade das misturas recicladas é idêntica à das misturas de referência.

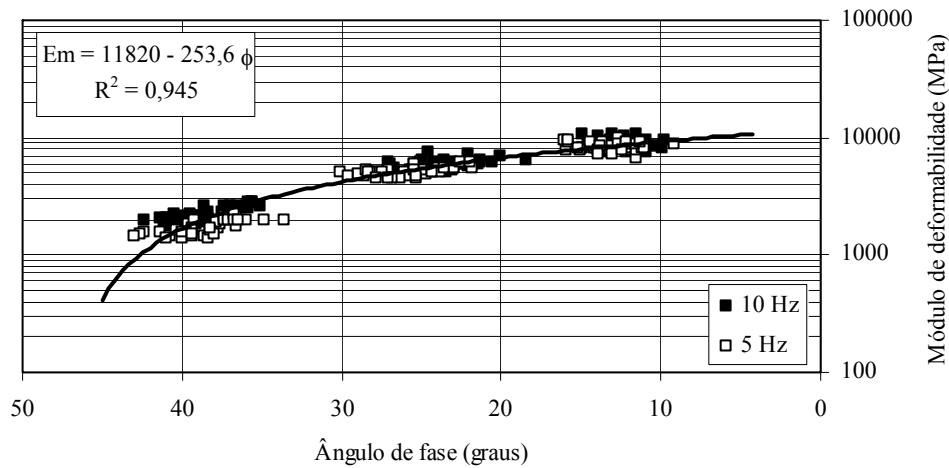


Figura 5.30 – Representação da relação entre o módulo de deformabilidade e o ângulo de fase no diagrama de *Black*, para frequências de 10 Hz e 5 Hz (misturas MBTE)

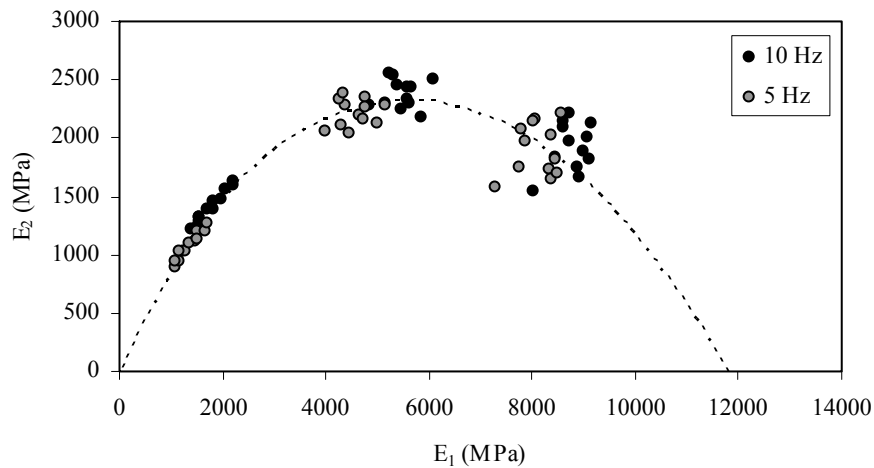


Figura 5.31 – Representação no diagrama de *Cole-Cole*, para frequências de 10 Hz e 5 Hz (misturas MBTE)

Em face dos resultados, pode dizer-se que, neste aspecto, não se observaram diferenças entre as misturas de referência e as misturas recicladas, podendo o ângulo de fase, nas misturas em estudo, para qualquer temperatura e para frequência de aplicação das cargas entre 5 Hz e 10 Hz, ser estimado a partir do módulo de deformabilidade, em MPa, pela expressão:

$$E_m = 11820 - 253,6 \phi \Leftrightarrow \phi = 46,6 - 0,00394 E_m \quad (5.31)$$

Desta forma, determinado o módulo de deformabilidade à temperatura de referência (25°C), primeiro pode estimar-se o módulo a 15°C e a 40°C, recorrendo às equações antes apresentadas na Figura 5.29 – ou para temperaturas intermédias interpolando – e, depois, estimar o respectivo ângulo de fase pela equação (5.31). Por outro lado, obtendo-se a 25°C um ângulo de fase idêntico ao indicado no Quadro 5.8 (página 200) poderá usar-se a mesma relação para estimar o módulo de deformabilidade para outras temperaturas em função do correspondente valor do ângulo de fase.

5.3.2 Resistência à fadiga

Na análise dos resultados dos ensaios de fadiga, seguiu-se a metodologia geral ou clássica, ajustando os valores medidos a uma equação do tipo $\epsilon = A.N^B$. Representam-se nas Figuras 5.32 a 5.35, as leis de fadiga das misturas, agrupadas por taxa de reciclagem, podendo assim fazer-se uma avaliação da influência da percentagem de betume em cada caso.

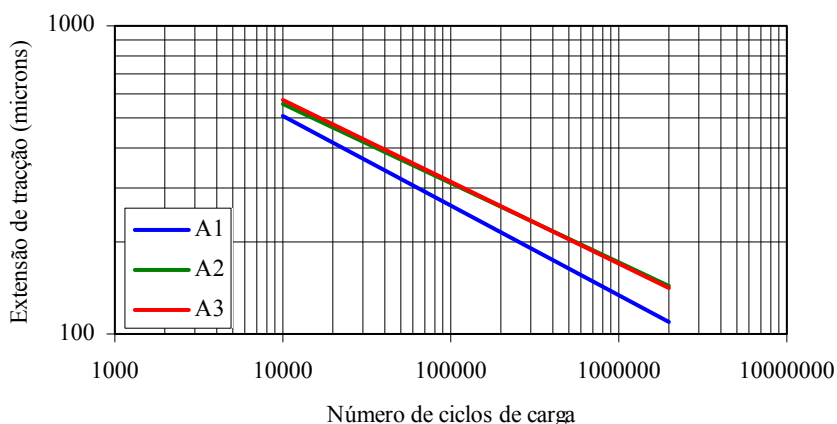


Figura 5.32 – Representação gráfica das leis de fadiga das misturas A1, A2 e A3

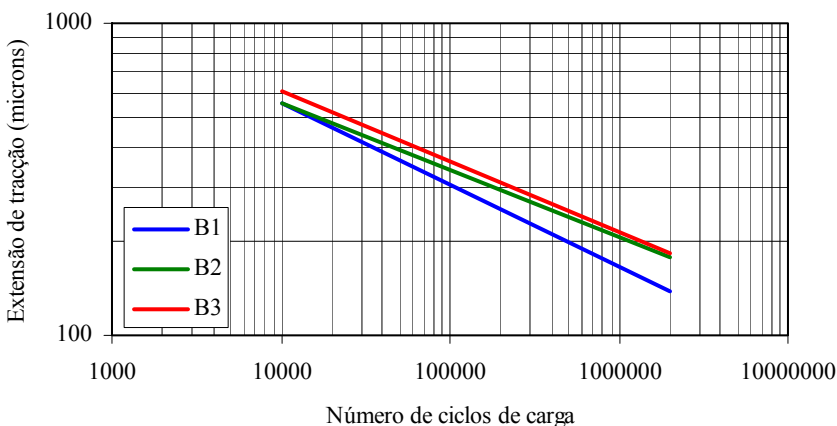


Figura 5.33 – Representação gráfica das leis de fadiga das misturas B1, B2 e B3

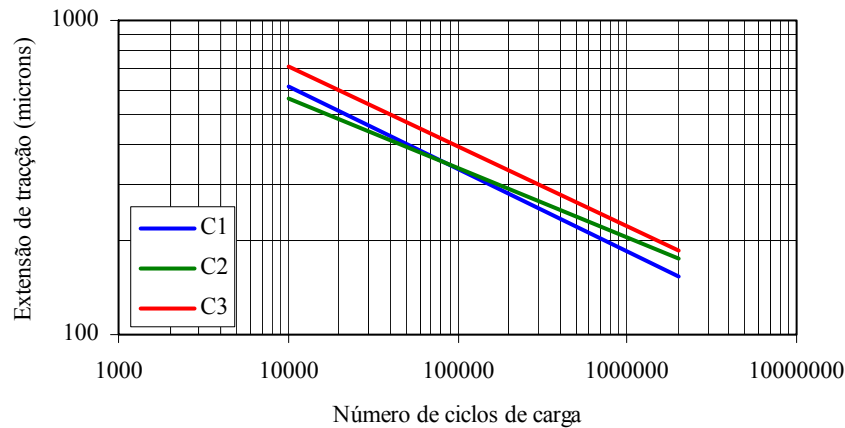


Figura 5.34 – Representação gráfica das leis de fadiga das misturas C1, C2 e C3

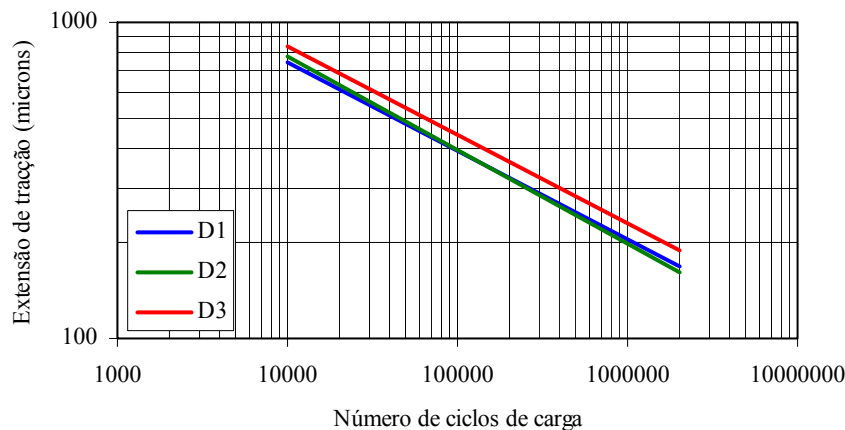


Figura 5.35 – Representação gráfica das leis de fadiga das misturas D1, D2 e D3

Nos gráficos, por uma questão de clareza de leitura, não se mostram os pares de valores que permitiram o ajuste. No entanto, essa informação pode ser consultado no Anexo I, onde se apresentam os resultados isoladamente para cada uma das misturas.

Determinou-se ainda a extensão de tração necessária para que haja rotura do material ao fim de um milhão de ciclos, designada por ϵ_6 . No Quadro 5.12 indicam-se as constantes A e B das leis de fadiga das misturas MBTE e o parâmetro ϵ_6 , obtidos pelo método geral e também pelo método da energia dissipada adaptado. Tomando como referência as leis de fadiga apresentadas, obtidas pelo método geral, e a Figura 5.36, onde se faz a correspondente representação gráfica de ϵ_6 para as doze misturas MBTE, é notória a influência da percentagem de betume no comportamento à fadiga, pois regista-se, para cada grupo de misturas com igual taxa de reciclagem, um melhor desempenho à fadiga das misturas com o aumento da percentagem de betume.

Quadro 5.12 – Parâmetros das leis de fadiga das misturas MBTE e extensão de tracção necessária para que haja rotura do material ao fim de 1 milhão de ciclos

Mistura	Método geral ou clássico			Método da energia dissipada adaptado		
	A	B	ϵ_6 (microns)	A	B	ϵ_6 (microns)
A1	7263,1	-0,289	134	5842,3	-0,268	145
A2	6102,3	-0,259	170	4552,9	-0,234	181
A3	6696,5	-0,266	171	4886,0	-0,236	189
B1	6154,9	-0,262	164	3575,4	-0,209	199
B2	3977,9	-0,214	207	3322,1	-0,195	226
B3	4927,5	-0,227	215	3712,8	-0,202	228
C1	6781,8	-0,261	184	4991,2	-0,229	210
C2	4252,4	-0,220	202	2947,7	-0,187	223
C3	7651,0	-0,257	220	4857,3	-0,214	252
D1	10072,3	-0,282	204	6995,5	-0,248	227
D2	12345,7	-0,299	199	9224,4	-0,274	210
D3	11151,2	-0,281	230	4018,2	-0,191	289

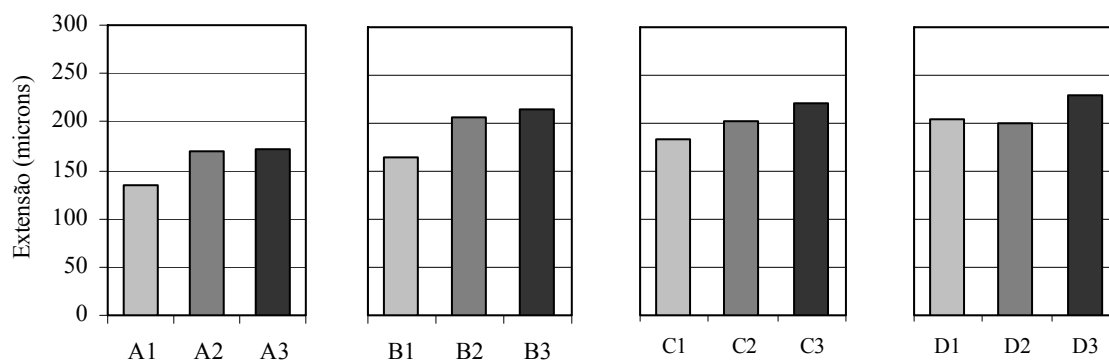


Figura 5.36 – Representação gráfica da extensão de tracção para que haja rotura do material ao fim de um milhão de ciclos, para as misturas MBTE

Por outro lado, verifica-se que as misturas recicladas, comparativamente às misturas de referência, “aparentam” um melhor desempenho à fadiga e que até melhora com o aumento da taxa de reciclagem. Ora, como se viu no Capítulo 4, a percentagem de betume total tomada como referência para a mistura média, em cada trecho, não é igual em todas as taxas de reciclagem.

Comparando a extensão ao fim de um milhão de ciclos e a percentagem de betume, nas doze misturas (Figura 5.37), confirma-se, não só a melhoria do desempenho com o aumento da percentagem de betume, mas também que as misturas encaixam numa mesma linha de tendência, o que denota que o comportamento das misturas recicladas é condicionado pela percentagem de ligante, tal como o das misturas tradicionais. A maior ou menor rigidez do

ligante, que também não varia de forma significativa, parece ter pouca influência nesta matéria.

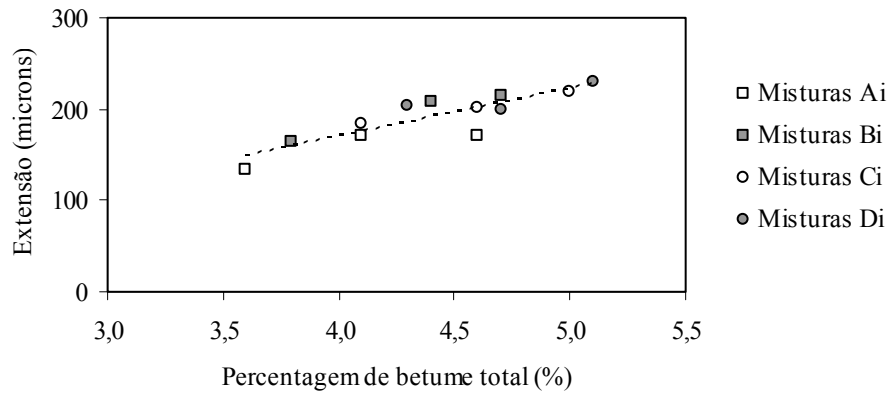


Figura 5.37 – Representação gráfica da relação entre a extensão de tração correspondente a um milhão de ciclos e a percentagem de betume, para as misturas MBTE

Por fim, verifica-se que a análise pelo método da energia dissipada adaptado conduz a uma hierarquização das misturas, em termos de comportamento à fadiga, idêntica à obtida pelo método geral (Figura 5.38).

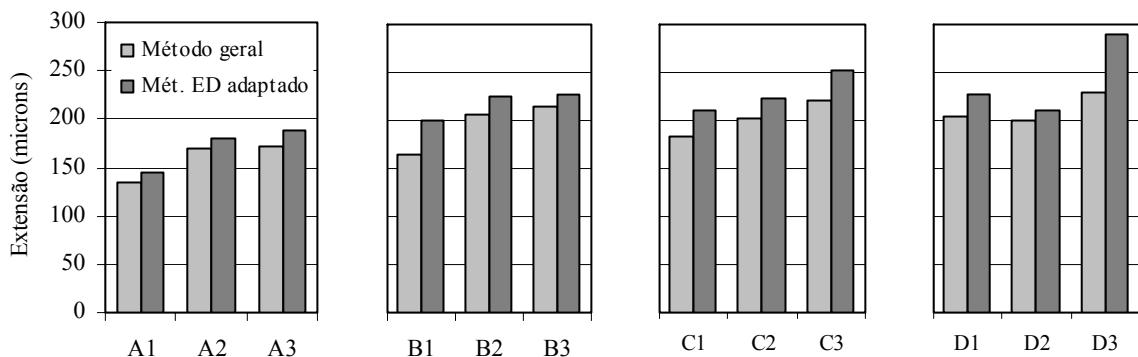


Figura 5.38 – Representação gráfica da extensão de tração para um milhão de ciclos, obtida pelo método geral e pelo método da energia dissipada adaptado, para as misturas MBTE

5.3.3 Resistência à deformação permanente

A análise que se irá fazer, terá por base as curvas médias de deformação permanente a que se chegou após a realização dos três tipos de ensaios antes referidos: compressão uniaxial de cargas repetidas, compressão triaxial de cargas repetidas e com simulador de tráfego. No Anexo I podem consultar-se os resultados referentes à curva média e a cada um dos respectivos provetes. Nos ensaios de compressão uniaxial e nos ensaios triaxiais a análise de

resultados será feita essencialmente em termos de velocidade de deformação e de extensão axial permanente no final do ensaio.

- Ensaio de compressão uniaxial de cargas repetidas

Os ensaios decorreram nas condições de temperatura e carregamento antes referidas e conduziram às curvas médias de extensão axial permanente representadas nas Figuras 5.39 a 5.42. Seguindo a metodologia de interpretação descrita neste capítulo, determinaram-se os parâmetros que se indicam no Quadro 5.13 e que têm o significado habitual. Os parâmetros resultantes do ajuste não linear (B e $\varepsilon_{1000,calc}$), indicados no mesmo quadro, mas não representados graficamente, regra geral seguem a mesma tendência da velocidade de deformação e da extensão axial permanente e conduzem à mesma hierarquização do comportamento das misturas.

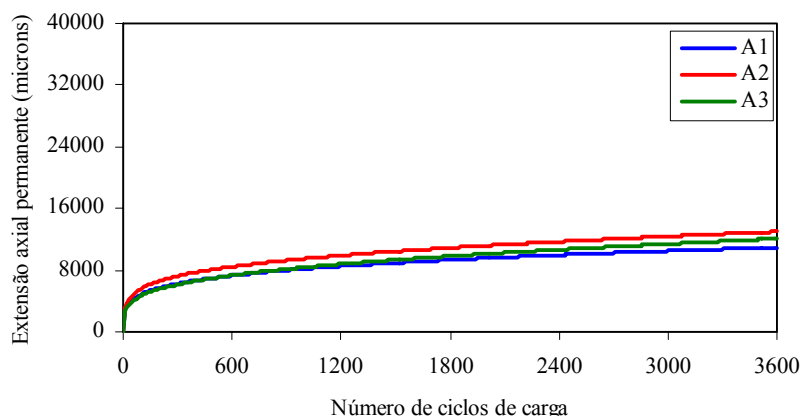


Figura 5.39 – Evolução da extensão axial permanente observada no ensaio de compressão uniaxial de cargas repetidas, para as misturas do trecho A

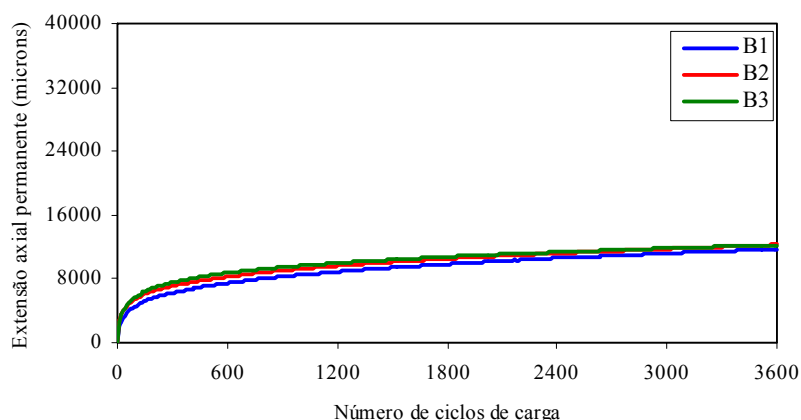


Figura 5.40 – Evolução da extensão axial permanente observada no ensaio de compressão uniaxial de cargas repetidas, para as misturas do trecho B

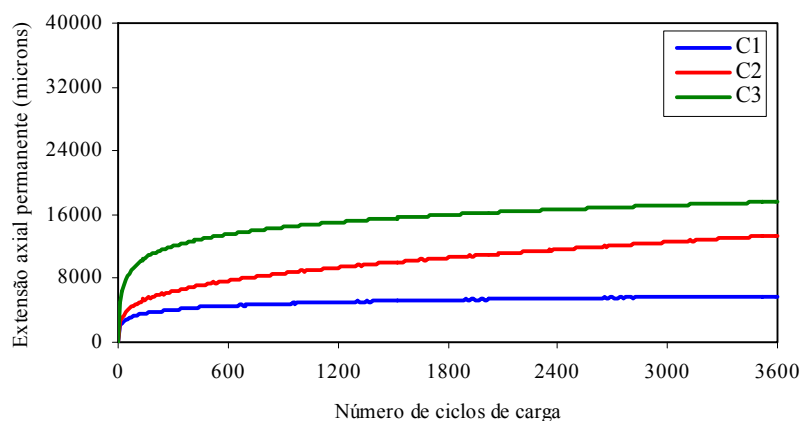


Figura 5.41 – Evolução da extensão axial permanente observada no ensaio de compressão uniaxial de cargas repetidas, para as misturas do trecho C

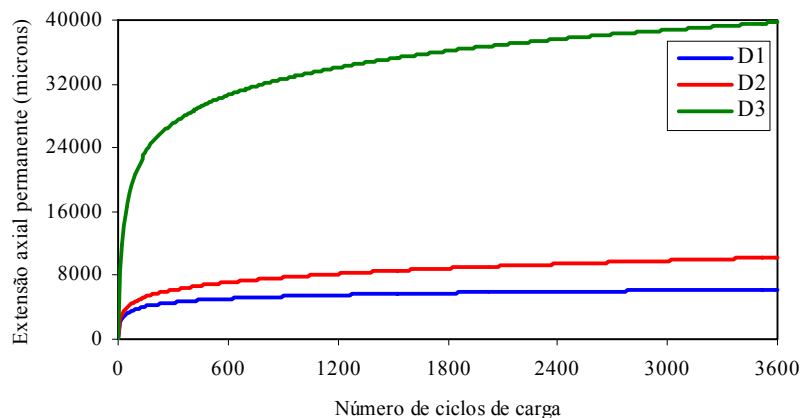


Figura 5.42 – Evolução da extensão axial permanente observada no ensaio de compressão uniaxial de cargas repetidas, para as misturas do trecho D

Quadro 5.13 – Resumo dos resultados dos ensaios de compressão uniaxial de cargas repetidas com as misturas MBTE

Mistura	ϵ_{3600} (microns)	Vdef (microns/ciclo)	S_N (MPa)	E_r (MPa)	A	B	$\epsilon_{1000,calc}$ (microns)
A1	10963	0,876	13,7	431,0	1720	0,226	8187
A2	13034	1,182	11,5	466,7	1896	0,234	9538
A3	12551	1,570	12,0	471,4	1376	0,263	8462
B1	11780	1,006	12,7	461,2	1363	0,264	8449
B2	12288	0,942	12,2	560,7	1947	0,225	9225
B3	12259	0,795	12,2	489,3	2191	0,212	9501
C1	5830	0,283	25,7	535,0	1698	0,152	4841
C2	13396	1,532	11,2	445,1	1264	0,285	9053
C3	17625	0,865	8,5	436,2	4482	0,169	14432
D1	6220	0,208	24,1	613,3	2024	0,140	5331
D2	10280	0,735	14,6	471,3	1832	0,211	7870
D3	39726	1,878	3,8	391,6	9007	0,188	33005

As curvas de deformação axial permanente evidenciam um comportamento idêntico nas misturas de referência (trecho A) e também nas misturas com incorporação de 20% de material fresado.

Nas misturas com 30% e 40% de material fresado é bem visível a influência da percentagem de betume no comportamento à deformação permanente (Figura 5.43, Figura 5.44 e Figura 5.45). De resto, os parâmetros determinados indicam que o comportamento à deformação permanente depende da percentagem de betume e da taxa de reciclagem, que condiciona a rigidez da mistura à temperatura de ensaio.

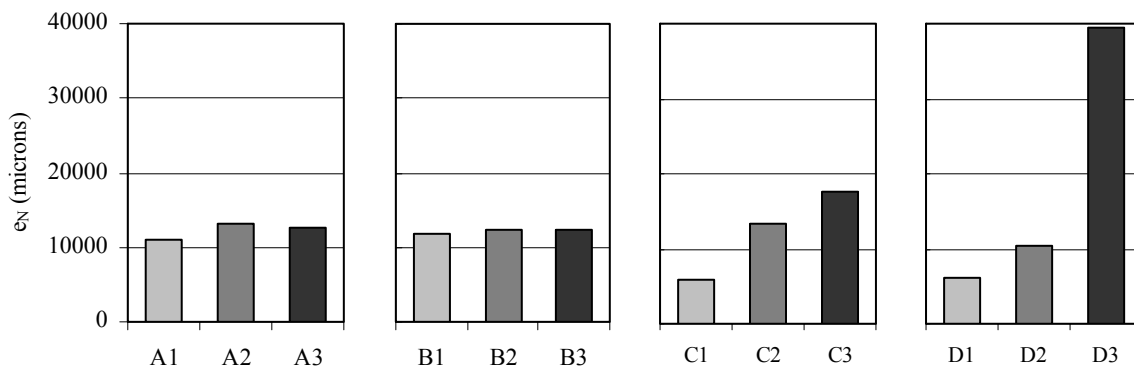


Figura 5.43 – Representação gráfica da extensão axial permanente das misturas MBTE, medida nos ensaios de compressão uniaxial de cargas repetidas

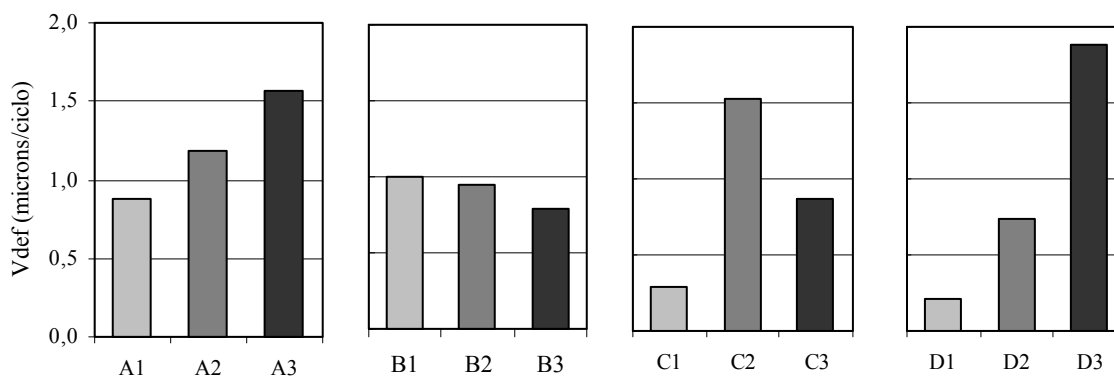


Figura 5.44 – Representação gráfica da velocidade de deformação das misturas MBTE, medida nos ensaios de compressão uniaxial de cargas repetidas

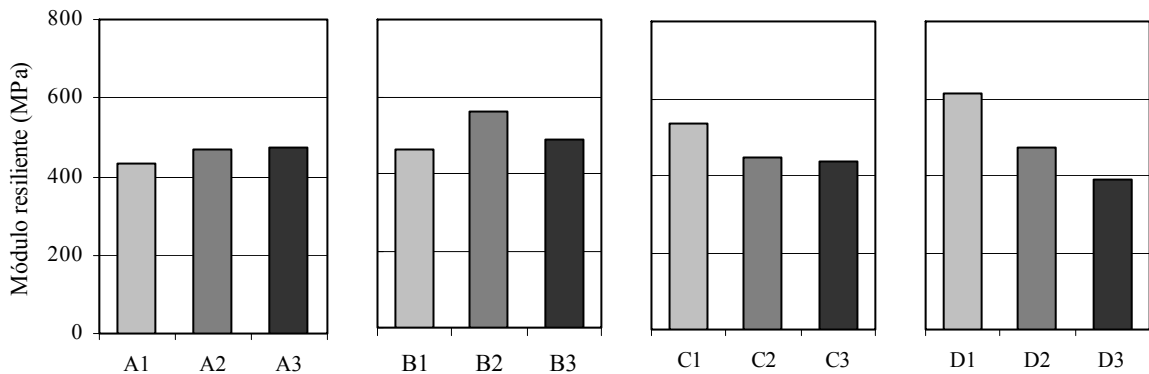


Figura 5.45 – Representação gráfica do módulo resiliente das misturas MBTE, medido nos ensaios de compressão uniaxial de cargas repetidas

Nos trechos de 30% e 40%, existe um melhor desempenho das misturas com mais baixa percentagem de betume (C1 e D1). Nas restantes misturas observa-se um desempenho idêntico para as três percentagens de betume, recaindo a escolha na percentagem de intermédia. Por outro lado, verifica-se que o módulo resiliente atinge os valores mais altos para percentagem de betume total na ordem dos 4,0% a 4,5% (Figura 5.46).

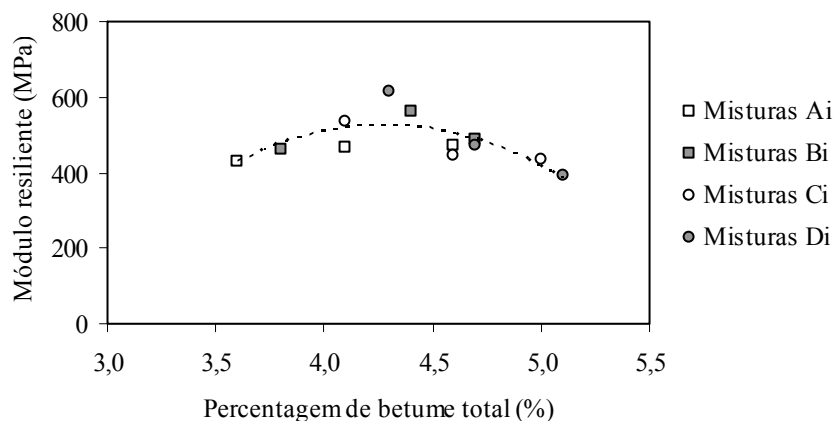


Figura 5.46 – Representação gráfica da relação entre o módulo resiliente, medido em ensaios de compressão uniaxial, e a percentagem de betume das misturas MBTE

- Ensaios de compressão triaxial de cargas repetidas

Nestes ensaios a metodologia de apresentação e análise dos resultados será idêntica, não esquecendo porém que os provetes se encontram durante o ensaio sujeitos a um estado de tensão bem diferente do considerado nos ensaios de compressão uniaxial. Os ensaios decorreram nas condições de temperatura e carregamento antes referidas e conduziram às curvas médias de deformação axial permanente que se representam nas Figuras 5.47 a 5.50.

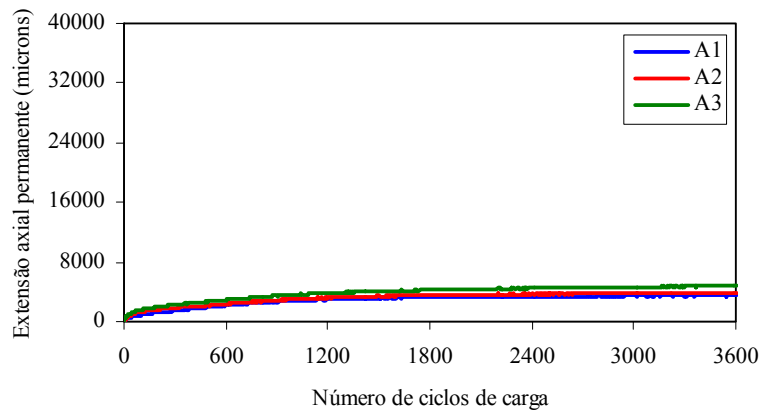


Figura 5.47 – Curvas de deformação axial permanente observadas no ensaio de compressão triaxial de cargas repetidas (misturas do trecho A)

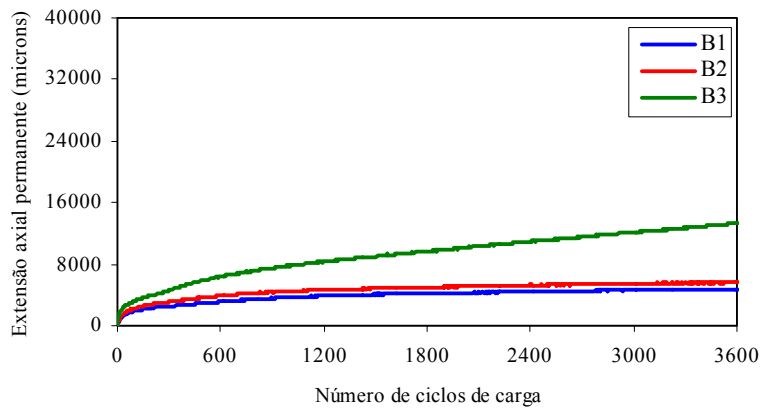


Figura 5.48 – Curvas de deformação axial permanente observadas no ensaio de compressão triaxial de cargas repetidas (misturas do trecho B)

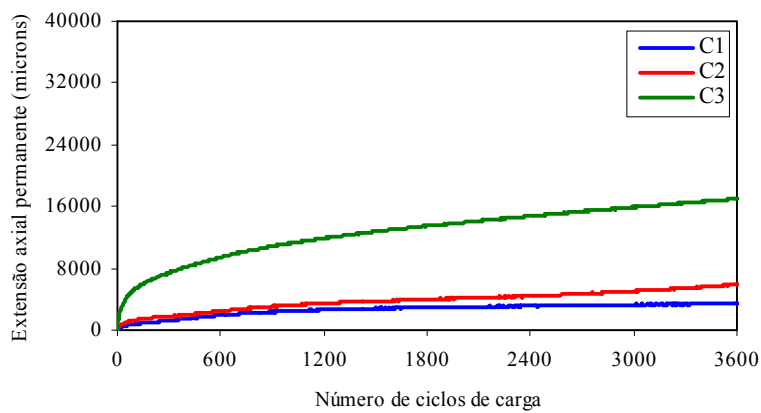


Figura 5.49 – Curvas de deformação axial permanente observadas no ensaio de compressão triaxial de cargas repetidas (misturas do trecho C)

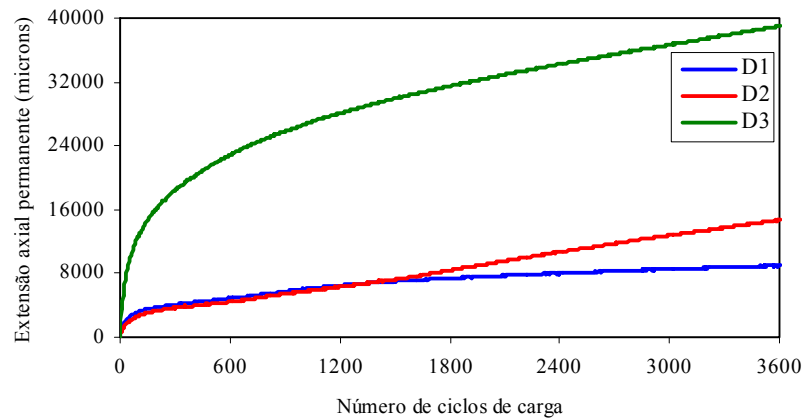


Figura 5.50 – Curvas de deformação axial permanente observadas no ensaio de compressão triaxial de cargas repetidas (misturas do trecho D)

No Quadro 5.14 indicam-se os parâmetros das curvas de deformação permanente obtidas nos ensaios triaxiais. Tal como nos ensaios de compressão uniaxial, verifica-se um comportamento idêntico nas três misturas de referência (trecho A).

Quadro 5.14 – Resumo dos resultados obtidos nos ensaios de compressão triaxial de cargas repetidas com as misturas MBTE

Mistura	ϵ_{3600} (microns)	Vdef (microns/ciclo)	S_N (MPa)	Er (MPa)	A	B	$\epsilon_{1000,calc}$ (microns)
A1	3477	0,136	115,0	338,5	172,5	0,384	2448
A2	3832	0,142	104,4	337,0	293,2	0,326	2787
A3	4793	0,277	83,5	284,2	360,7	0,325	3398
B1	4761	0,295	84,0	280,9	260,1	0,273	3521
B2	5588	0,310	71,6	265,8	670,4	0,267	4231
B3	13302	1,989	30,1	251,5	503,5	0,396	7784
C1	3403	0,272	117,5	293,6	127,9	0,413	2212
C2	5924	1,112	67,5	269,0	163,1	0,428	3145
C3	17003	1,911	23,5	261,6	1063,0	0,339	11068
D1	8996	0,838	44,5	277,1	670,8	0,318	6046
D2	14680	3,427	27,2	276,8	202,2	0,505	6633
D3	38063	3,902	10,5	279,7	2794,0	0,324	26124

Nas misturas com incorporação de material fresado é notória a influência da percentagem de betume no comportamento à deformação permanente (Figura 5.51, 5.52 e 5.53).

O módulo resiliente assume valores baixos, comparativamente aos determinados nos ensaios de compressão uniaxial, o que demonstra que as características de deformabilidade das misturas betuminosas, recicladas ou não, dependem do estado de tensão a que estão sujeitas.

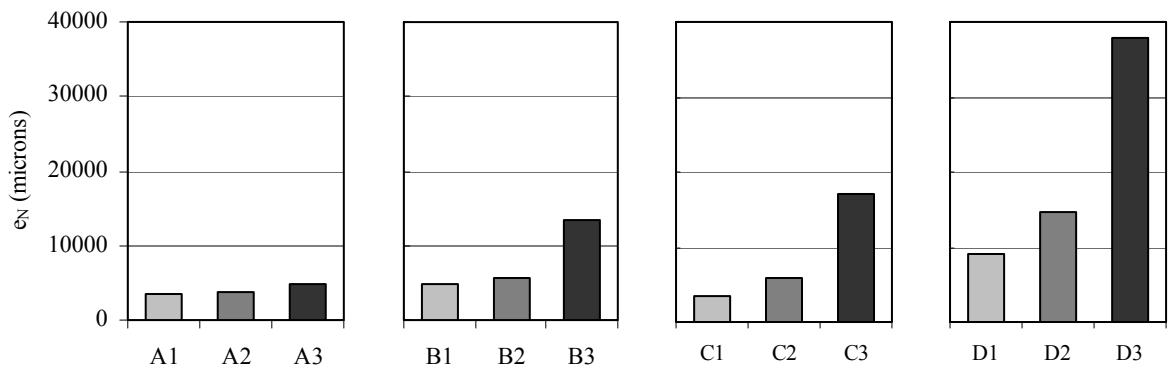


Figura 5.51 – Representação gráfica da extensão axial permanente das misturas MBTE, medida nos ensaios de compressão triaxial de cargas repetidas

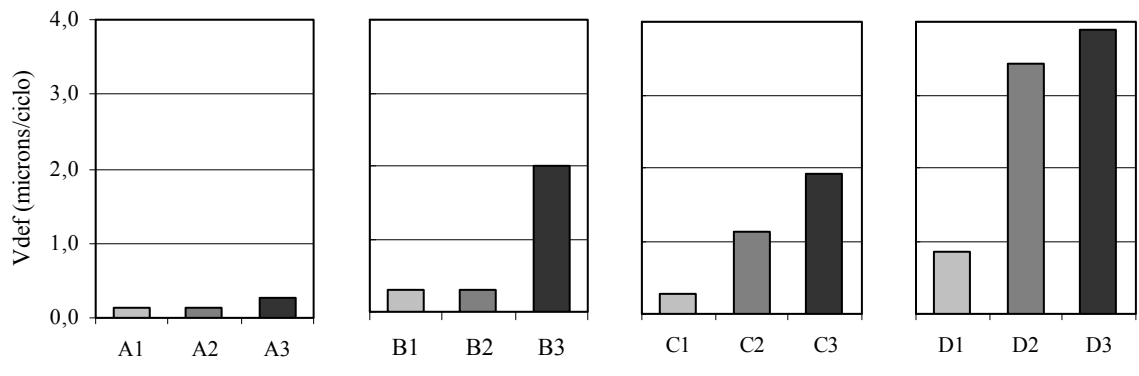


Figura 5.52 – Representação gráfica da velocidade de deformação das misturas MBTE, medida nos ensaios de compressão triaxial de cargas repetidas

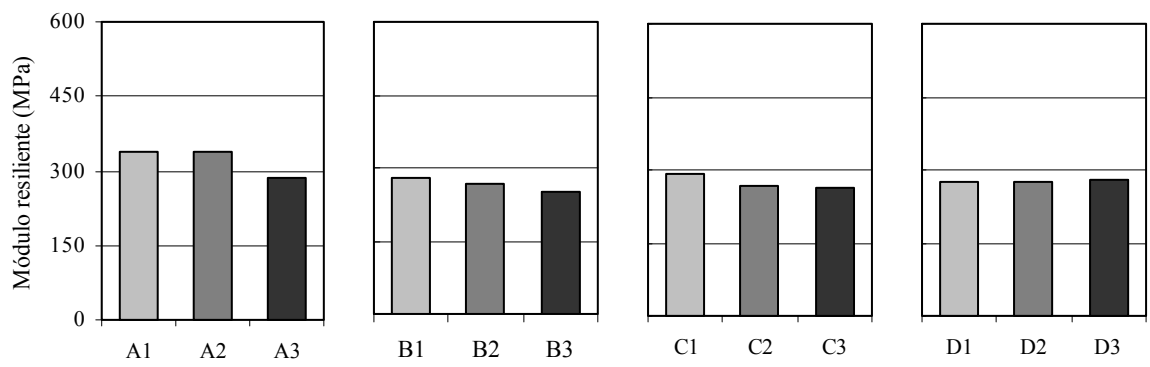


Figura 5.53 – Representação gráfica do módulo resiliente das misturas MBTE, medido nos ensaios de compressão triaxial de cargas repetidas

- Ensaio com simulador de tráfego

Seguindo a metodologia descrita, apresentam-se nas Figuras 5.54 a 5.57 as curvas de deformação permanente obtidas nos ensaios com simulador de tráfego.

Os parâmetros retirados das curvas, deformação total e velocidade de deformação, indicam-se no Quadro 5.15. Com vista a uma fácil interpretação dos resultados alcançados, nas Figuras 5.58 e 5.59 representam-se graficamente os parâmetros referidos.

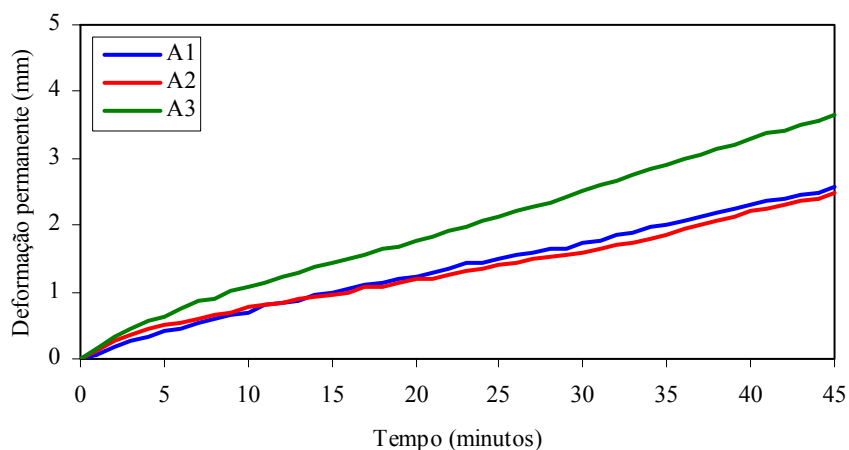


Figura 5.54 – Evolução do valor médio da deformação permanente observada no ensaio com simulador de tráfego (misturas do trecho A)

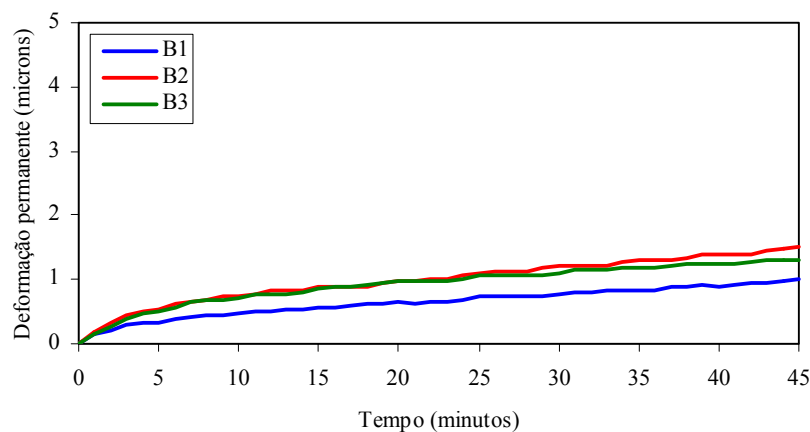


Figura 5.55 – Evolução do valor médio da deformação permanente observada no ensaio com simulador de tráfego (misturas do trecho B)

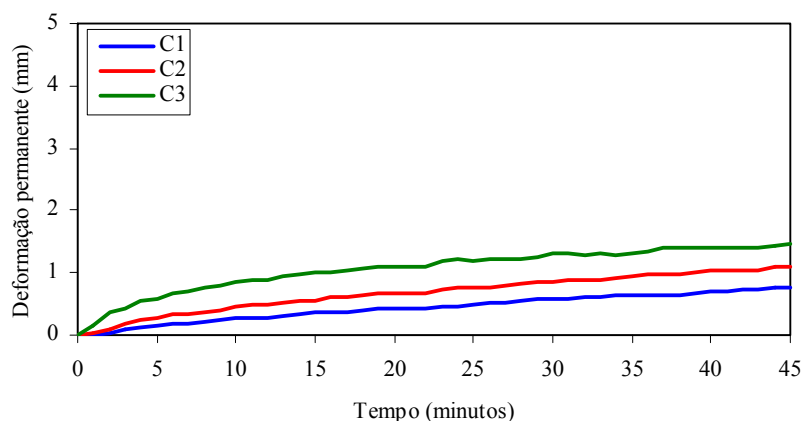


Figura 5.56 – Evolução do valor médio da deformação permanente observada no ensaio com simulador de tráfego (misturas do trecho C)

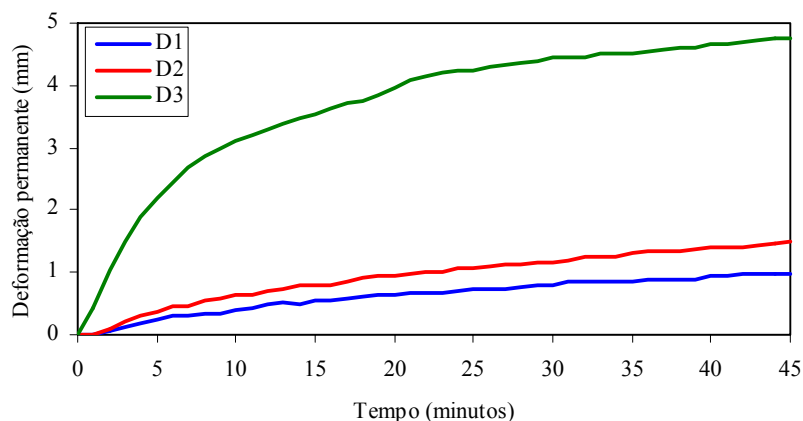


Figura 5.57 – Evolução do valor médio da deformação permanente observada no ensaio com simulador de tráfego (misturas do trecho D)

Quadro 5.15 – Valores observados no ensaio com simulador de tráfego: deformação permanente, velocidade de deformação (Vdef)

Mistura	Deformação (mm)	Vdef (mm/min)	Vdef (mm/h)
A1	2,57	0,0554	3,32
A2	2,50	0,0612	3,67
A3	3,64	0,0752	4,51
B1	1,00	0,0145	0,87
B2	1,51	0,0210	1,26
B3	1,31	0,0132	0,79
C1	0,76	0,0126	0,76
C2	1,11	0,0175	1,05
C3	1,46	0,0114	0,68
D1	0,97	0,0118	0,71
D2	1,48	0,0194	1,16
D3	4,77	0,0230	1,38

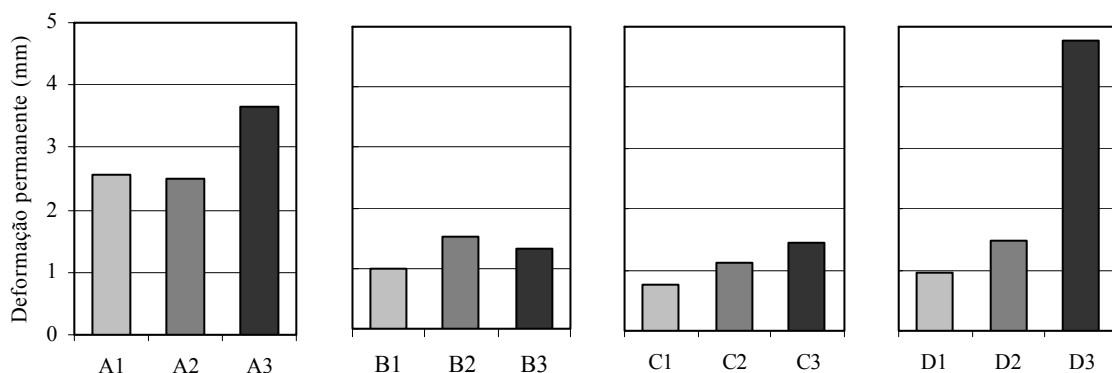


Figura 5.58 – Representação gráfica da deformação permanente das misturas MBTE, medida nos ensaios com simulador de tráfego

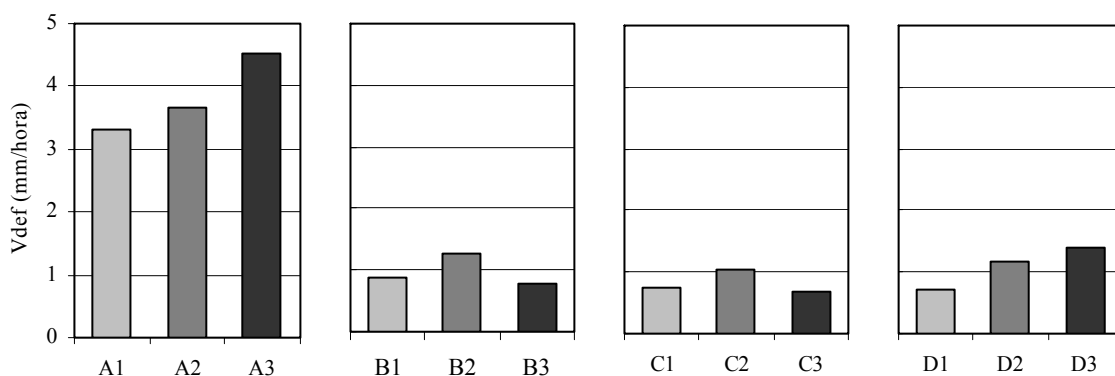


Figura 5.59 – Representação gráfica da velocidade de deformação das misturas MBTE, medida nos ensaios com simulador de tráfego

- Considerações sobre o comportamento à deformação permanente

Os parâmetros de referência, deformação permanente e velocidade de deformação, regra geral aumentam com a percentagem de betume em cada um dos conjuntos de misturas e para os três tipos de ensaios. No global, os resultados de ambos os parâmetros, obtidos nos ensaios com simulador de tráfego, revelam um melhor desempenho das MBRQ comparativamente às misturas sem incorporação de material fresado. Porém, nos ensaios de compressão uniaxial e triaxiais o comportamento à deformação permanente das MBRQ seleccionadas é idêntico ao das misturas de referência.

Tendo em conta que os provetes laje exigem mais tempo e não são tão simples de extrair dos pavimentos ou produzir em laboratório (o que não se fez), havia que optar para as restantes misturas entre os ensaios de compressão uniaxial ou os triaxiais. Nestes últimos ensaios os provetes são iguais e, tendo em conta que ambos servem para o fim que se pretende, optou-se,

nas misturas MBLB e BDLB, pelos ensaios de compressão uniaxial por serem muito mais simples de realizar.

Analisou-se ainda a influência da porosidade e da percentagem de betume no desempenho à deformação permanente das misturas MBTE, tomando como referência os resultados dos ensaios de compressão uniaxial e triaxiais. Em termos de deformação permanente, alguns autores indicam 3% como limite crítico de referência para a porosidade e abaixo do qual as misturas tendem a apresentar um pior desempenho à deformação permanente. Todavia, nas misturas MBTE, verifica-se que a deformação permanente aumenta de forma significativa para porosidade abaixo de 2% (Figura 5.60). Em termos de percentagem de betume observa-se um pior desempenho para misturas com mais de 5% de betume (Figura 5.61).

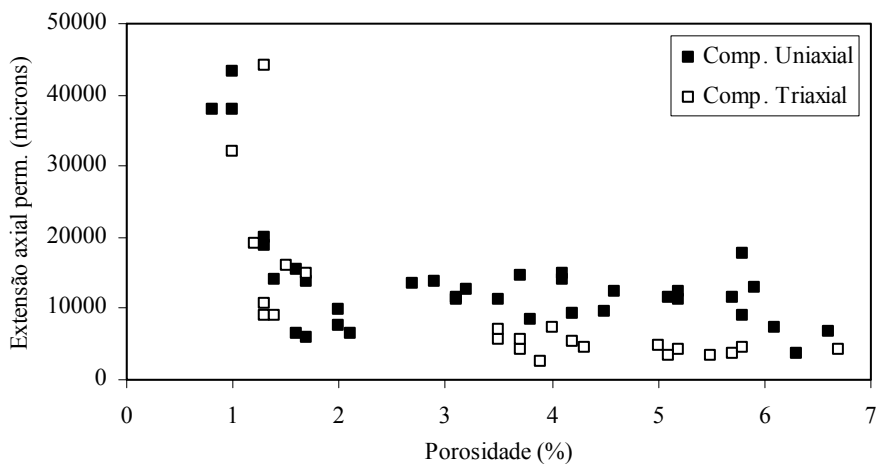


Figura 5.60 – Deformação permanente das misturas MBTE em função da porosidade

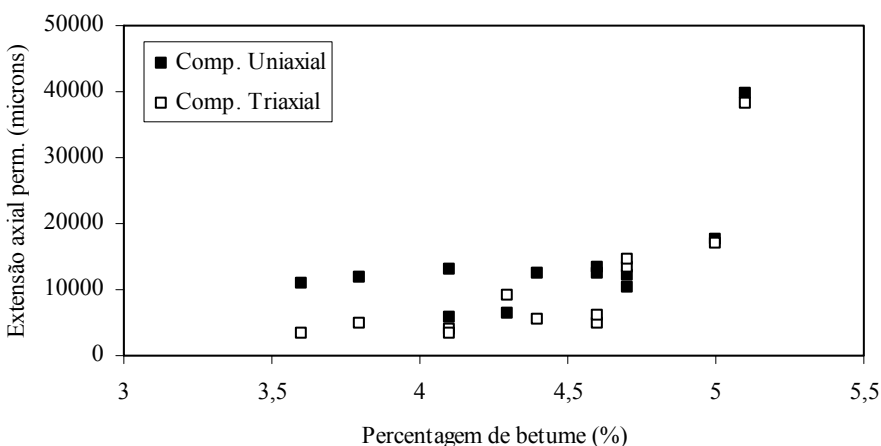


Figura 5.61 – Deformação permanente das misturas MBTE em função da percentagem de betume

5.3.4 Análise global do desempenho das misturas

Terminada a avaliação das características de deformabilidade das misturas, do seu comportamento à fadiga e à deformação permanente e tiradas as inferências específicas em cada caso, justifica-se uma análise comparativa do desempenho das misturas MBTE. Primeiro fez-se uma análise qualitativa das características mecânicas das misturas e que conduziu aos resultados que se resumem no Quadro 5.16.

Quadro 5.16 – Resumo da avaliação qualitativa do desempenho das misturas MBTE

Característica mecânica	Classificação	Trecho A	Trecho B	Trecho C	Trecho D
Características de deformabilidade	Melhor	A1/A2	B1/B2	C1/C2	D1/D2
	Pior	A3	B3	C3	D3
Resistência à fadiga	Melhor	A2/A3	B2/B3	C1/C2/C3	D1/D2/D3
	Pior	A1	B1	-	-
Deformação permanente em <i>Whell Tracking</i>	Melhor	A1/A2	B1/B2/B3	C1/C2	D1/D2
	Pior	A3	-	C3	D3
Deformação permanente em compressão uniaxial	Melhor	A1/A2	B1/B2/B3	C1	D1
	Pior	A3	-	C2,C3	D2,D3
Deformação permanente em ensaios triaxiais	Melhor	A1/A2	B1/B2	C1	D1
	Pior	A3	B3	C2/C3	D2/D3
Mistura seleccionada		A2	B2	C1	D1

Fazendo uma análise individualizada por trecho, conclui-se que entre as composições estudadas, existe uma indicação de melhor desempenho das misturas A2, B2, C1 e D1, as quais apresentam percentagem de betume idêntica e a oscilar entre 4,1% e 4,4%. Observa-se assim que a percentagem de betume total nas misturas será pouco dependente da taxa de reciclagem e idêntica à das misturas tradicionais. Aliás, por essa razão se adoptou igual percentagem total de betume nas misturas de macadame compactadas em laboratório (4,2%).

Propõe-se ainda uma metodologia de análise alternativa com base num indicador de desempenho, ID, que conjuga o comportamento à fadiga e à deformação permanente:

$$ID = C_{FD} \times ID_{FD} + C_{DP} \times ID_{DP} \quad (5.32)$$

onde,

ID_{FD} - indicador de desempenho à fadiga;

ID_{DP} - indicador de desempenho à deformação permanente;

CD_{FD} e CD_{DP} - coeficientes de ponderação do comportamento à fadiga e à deformação permanente e cuja soma é igual à unidade.

Os coeficientes de ponderação poderão ser iguais a 0,5 nas misturas em que o desempenho à fadiga e à deformação permanente têm peso idêntico na decisão. Nas misturas em que o comportamento à deformação permanente é fundamental, como são as misturas aplicadas nas

camadas de desgaste, poderá adoptar-se CD_{DP} igual a 2/3 e CD_{FD} de 1/3. Na situação inversa, comopor exemplo em misturas usadas em camadas de base, sugere-se CD_{DP} igual a 1/3 e CD_{FD} de 2/3. Para cálculo do indicador de desempenho à fadiga, tomou-se como referência o parâmetro ε_6 das leis de fadiga das misturas em estudo. Na expressão (5.33), $\varepsilon_{6,max}$ representa o valor máximo de ε_6 de todas as misturas cujo desempenho se pretende comparar.

$$ID_{FD} = \frac{\varepsilon_6}{\varepsilon_{6,max}} \quad (5.33)$$

No cálculo do indicador de desempenho à deformação permanente tomou-se como referência a velocidade de deformação.

$$ID_{DP} = \frac{V_{def_{min}}}{V_{def}} \quad (5.34)$$

Na avaliação consideraram-se os resultados dos ensaios de compressão uniaxial de cargas repetidas. Aplicou-se a metodologia aos resultados dos ensaios de fadiga e de deformação permanente das misturas MBTE, atribuindo igual peso aos dois indicadores visto que se trata duma mistura a aplicar numa camada intermédia.

Os resultados (Quadro 5.17), representados graficamente na Figura 5.62, na generalidade corroboram a anterior selecção das misturas e revelam que, globalmente, as MBRQ apresentam um desempenho igual ou superior ao da mistura de referência sem incorporação de material fresado.

Quadro 5.17 – Resumo dos indicadores de desempenho das misturas MBTE

Mistura	ID_{FD}	ID_{DP}	ID
A1	0,58	0,24	0,41
A2	0,74	0,18	0,46
A3	0,74	0,13	0,44
B1	0,71	0,21	0,46
B2	0,90	0,22	0,56
B3	0,93	0,26	0,59
C1	0,80	0,73	0,77
C2	0,88	0,14	0,51
C3	0,96	0,24	0,60
D1	0,89	1,00	0,95
D2	0,87	0,28	0,58
D3	1,00	0,11	0,56

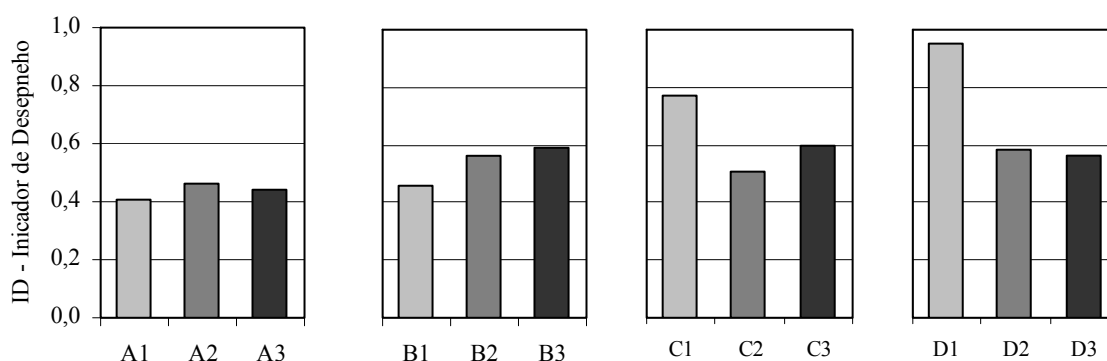


Figura 5.62 – Representação gráfica do indicador de desempenho das misturas MBTE

5.4 Apresentação e Análise dos Resultados das Misturas MBLB

5.4.1 Módulos de deformabilidade e ângulos de fase

Como se disse, as misturas de macadame compactadas em laboratório, MBLB⁶, foram todas produzidas com a mesma percentagem de betume total. Procurou-se então analisar a influência da taxa de reciclagem, das condições de ensaio e do tipo de betume adicionado no comportamento mecânico das misturas.

Nos Quadros 5.18 a 5.20 apresentam-se os resultados do módulo de deformabilidade e do ângulo de fase, respectivamente para 15°C, 25°C e 40°C, das misturas de macadame betuminoso compactadas em laboratório e obtidos nas mesmas condições das misturas dos trechos. Para facilitar a leitura dos resultados, optou-se por representar o módulo de deformabilidade das oito misturas a 10 Hz (Figura 5.63).

Quadro 5.18 – Módulos de deformabilidade e ângulos de fase das misturas MBLB, medidos a 15°C

Mistura	Módulo de deformabilidade (MPa)			Ângulo de fase (graus)		
	10 Hz	5 Hz	1 Hz	10 Hz	5 Hz	1 Hz
LA	10838	10482	7071	14,4	15,0	17,9
LB	11145	10943	8056	10,4	11,5	12,1
LC	11200	10843	8464	10,5	10,5	10,5
LD	11127	10490	8114	9,4	9,5	10,6
LE	11136	10642	8077	10,7	10,8	11,0
LF	9763	9689	7225	10,1	8,9	9,2
LG	9605	9020	6783	11,7	12,0	12,7
LH	9844	9523	7199	11,0	11,5	11,6

⁶ Macadame betuminoso produzido e compactado em laboratório conforme designação adoptada no Capítulo 4 (Quadro 4.11, página 115).

Quadro 5.19 – Módulos de deformabilidade e ângulos de fase das misturas MBLB, medidos a 25°C

Mistura	Módulo de deformabilidade (MPa)			Ângulo de fase (graus)		
	10 Hz	5 Hz	1 Hz	10 Hz	5 Hz	1 Hz
LA	7024	5670	3401	27,8	30,9	33,0
LB	8258	7434	4977	19,5	21,4	22,1
LC	9301	8351	5912	17,2	19,0	20,4
LD	8793	8372	5707	14,5	16,3	16,9
LE	7897	7489	5497	15,9	17,4	18,6
LF	7992	7573	5905	14,5	15,5	16,1
LG	6873	6117	4087	18,8	20,3	21,0
LH	7492	6876	4661	16,7	17,9	17,6

Quadro 5.20 – Módulos de deformabilidade e ângulos de fase das misturas MBLB, medidos a 40°C

Mistura	Módulo de deformabilidade (MPa)			Ângulo de fase (graus)		
	10 Hz	5 Hz	1 Hz	10 Hz	5 Hz	1 Hz
LA	2314	1737	1078	40,6	40,4	32,5
LB	3481	2684	1729	32,9	33,6	28,0
LC	4085	3247	2160	30,1	31,0	28,0
LD	4606	3692	2402	28,2	30,1	27,3
LE	4085	3222	1988	28,9	30,1	27,2
LF	4460	3709	2375	24,2	26,3	24,7
LG	3130	2499	1663	29,2	29,6	26,5
LH	3779	3038	2008	25,9	27,0	24,3

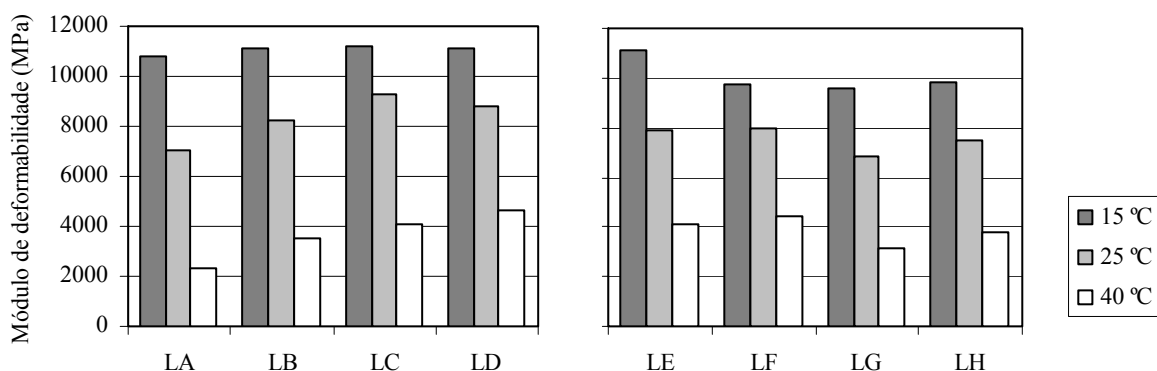


Figura 5.63 – Representação gráfica do módulo de deformabilidade das misturas MBLB, para frequência de 10 Hz

- Influência da taxa de reciclagem e do tipo de betume de adição

Nas misturas produzidas com betume 35/50 (LA, LB, LC e LD) verifica-se uma nítida influência da taxa de reciclagem na rigidez das misturas, mais visível na temperatura de 40°C, motivada pela maior rigidez do ligante final. As misturas com incorporação de 30% e 40% de material fresado exibem a 25°C, para os três betumes de adição, módulos de deformabilidade idênticos.

Julga-se que o aumento do módulo com a taxa de reciclagem, nas temperaturas mais altas, observado na generalidade das misturas compactadas em laboratório, não se verificou de forma tão visível nas misturas dos trechos porque na central o material fresado foi introduzido a frio e portanto houve menor entrosamento final da mistura e logo menor influência na rigidez final.

A análise dos resultados permite concluir que o módulo de deformabilidade das misturas compactadas em laboratório é normalmente superior ao da mistura de referência (LA), o que se deve à maior rigidez do ligante final motivada pela presença do ligante endurecido devido à idade. Como seria de esperar, para a mesma taxa de reciclagem, o módulo de deformabilidade é tanto menor quanto mais brando é o betume de adição (Figura 5.64). Contudo as misturas recicladas com os betumes 50/70 e 70/100, não deixam de apresentar valores perfeitamente normais comparativamente à mistura de referência (LA).

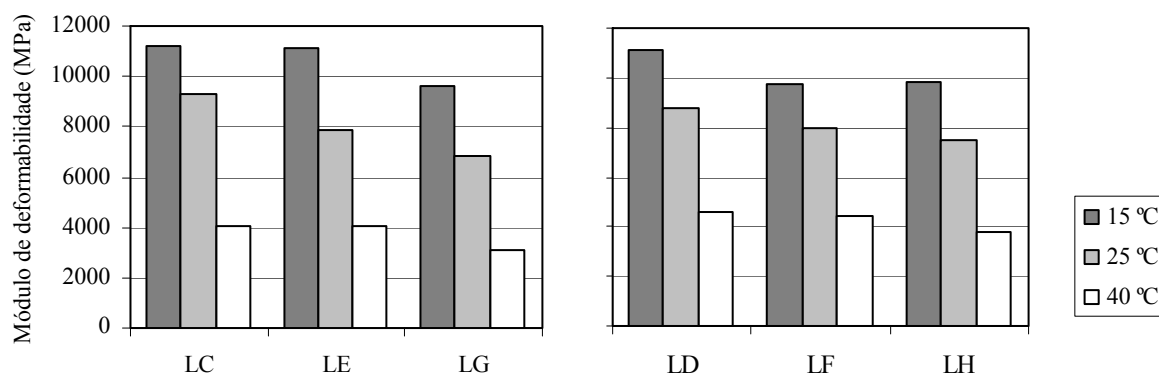


Figura 5.64 – Representação gráfica do módulo de deformabilidade das misturas MBLB, com taxas de reciclagem de 30% (LC, LE e LG) e 40% (LD, LF e LH), para frequência de 10 Hz

Por fim, avaliou-se a influência conjunta da taxa de reciclagem e do betume de adição, recorrendo a uma estimativa da penetração do ligante final, a qual depende da penetração do betume novo, da penetração do betume envelhecido existente no material fresado e da proporção entre eles (TRb). No Quadro 5.21 indicam-se os valores relativos às misturas MBLB estudadas.

Quadro 5.21 – Resumo da estimativa da penetração do ligante final das misturas MBLB

Mistura	Percentagem de betume (%)			TRb (%)	Penetração do betume (10^{-1} mm)		
	pb _N	pb _F ×TR	pb _R		pen _N	pen _F	pen _R
LA	4,2	0,0	4,2	0,0	39	-	39
LB	3,4	0,8	4,2	19,0	39	14	32
LC	3,0	1,2	4,2	28,6	39	14	29
LD	2,6	1,6	4,2	38,1	39	14	26
LE	3,0	1,2	4,2	28,6	55	14	37
LF	2,6	1,6	4,2	38,1	55	14	33
LG	3,0	1,2	4,2	28,6	86	14	51
LH	2,6	1,6	4,2	38,1	86	14	43

A relação entre o módulo de deformabilidade e a penetração do ligante final, representada na Figura 5.65, para a frequência de 10 Hz, confirma a dependência entre as duas grandezas, observando-se o natural aumento do módulo com o aumento da rigidez do betume final, consubstanciado numa redução da sua penetração. Embora não se apresentem, nas frequências mais baixas regista-se a mesma tendência.

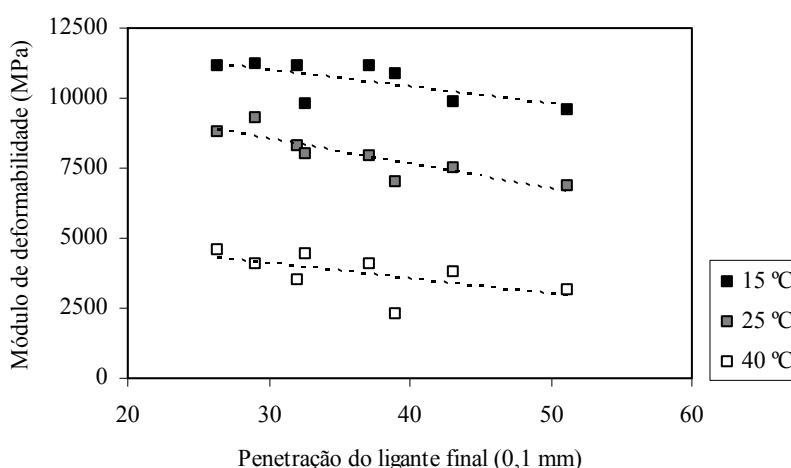


Figura 5.65 – Relação entre o módulo de deformabilidade das misturas MBLB (medido a 10 Hz) e a estimativa da penetração do ligante final

- Influência das condições de ensaio

As características de deformabilidade destas misturas são influenciadas pelas condições de ensaio de forma análoga às misturas MBTE. Contudo, verifica-se que a susceptibilidade térmica é diferente e dependente da taxa de reciclagem e também do betume de adição. No que respeita à influência da frequência de ensaio, usou-se a abordagem a que já se recorreu nas misturas MBTE. Tomou-se como referência a frequência de 10 Hz e interpretaram-se os resultados, comparando os módulos medidos a 5 Hz (Em5) e a 1 Hz (Em1), com o módulo de deformabilidade medido a 10 Hz (Em10). Na Figura 5.66 representam-se os conjuntos de

valores medidos nos 48 ensaios (8 misturas, 3 temperaturas, 3 provetes/temperatura) com as misturas MBTE. Indicam-se ainda as respectivas leis de ajuste do tipo $Em = A (Em10)^B$.

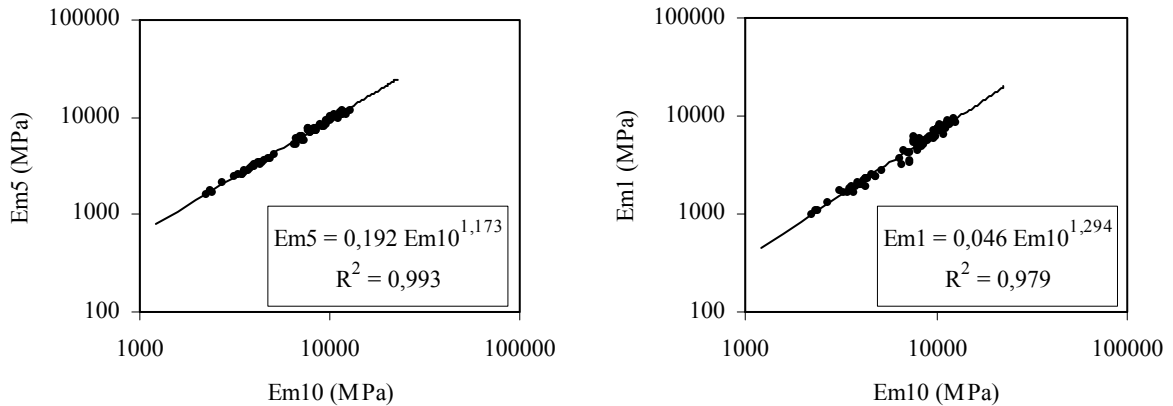


Figura 5.66 – Relação entre os módulos de deformabilidade das misturas MBLB a 5 Hz (Em5) e a 1 Hz (Em1) e o módulo de deformabilidade a 10 Hz (Em10)

Em face dos resultados, conclui-se que as relações entre Em5 e Em10 e entre Em1 e Em10, conduzem a ajustes muito satisfatórios e independentes da temperatura de ensaio e da composição da mistura. Desta forma, medindo o módulo de deformabilidade a 10 Hz (velocidade de 65 km/h) poderá estimar-se o módulo de deformabilidade a 5Hz (cerca de 30 km/h) e a 1Hz (cerca de 10 km/h). Fez-se a mesma análise em termos de temperatura, tomando como referência o módulo medido a 25°C (Em25). Interpretaram-se os resultados, comparando os módulos medidos a 15°C (Em15) e a 40°C (Em40), com o módulo de deformabilidade de referência. Na Figura 5.67 representam-se os pares de valores médios (12 misturas e 3 frequências de ensaio) e ainda as respectivas leis de ajuste.

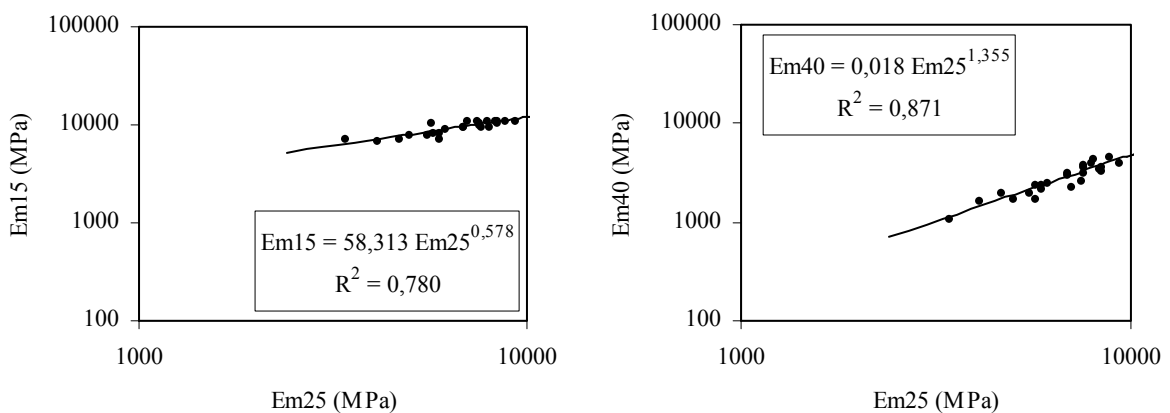


Figura 5.67 – Relação entre os módulos de deformabilidade das misturas MBLB a 15°C (Em15) e a 40°C (Em40) e o módulo de deformabilidade a 25°C (Em25)

Efectuou-se também uma análise desagregada por tipo de betume de adição, considerando a influência da frequência (Quadro 5.22). Pode dizer-se que a influência da frequência de carregamento é idêntica para as diversas misturas, visto que mesmo quando consideradas em conjunto existe boa correlação para os pares de frequências em causa.

Quadro 5.22 – Parâmetros das leis do tipo $E_m = A (E_m10)^B$ das misturas MBLB, que relacionam os módulos E_{m5} e E_{m1} com o módulo de deformabilidade a 10 Hz (E_{m10})

Misturas	Betume	Parâmetros E_{m5}			Parâmetros E_{m1}		
		A	B	R ²	A	B	R ²
LA, LB, LC e LD	35/50	0,194	1,171	0,994	0,052	1,128	0,982
LE, LF	50/70	0,157	1,198	0,988	0,018	1,404	0,978
LG, LH	70/100	0,211	1,164	0,997	0,069	1,250	0,987
Todas as misturas		0,192	1,173	0,993	0,046	1,294	0,979

- Relação entre o módulo de deformabilidade e o ângulo de fase

Nas condições de ensaio adoptadas, a relação entre o módulo de deformabilidade e o ângulo de fase (5.3, página 177), nas misturas MBLB, é aproximadamente linear. Analisaram-se todos os pares de valores (E_m , ϕ) e estudou-se a relação entre o módulo de deformabilidade e o ângulo de fase. No Quadro 5.23 indicam-se, por tipo de betume de adição e no global, os parâmetros de regressão para as diferentes frequências.

Quadro 5.23 – Parâmetros de ajuste da relação linear entre o módulo de deformabilidade e o ângulo de fase

Misturas	10 Hz		5 Hz		1 Hz		10 Hz + 5 Hz	
	A	B	A	B	A	B	A	B
LA, LB, LC, LD	14248	-308,4	14176	-320,0	11545	-306,4	14231	-315,2
LE, LF	13407	-336,5	13310	-344,6	11001	-327,1	13379	-341,8
LG, LH	13630	-362,1	13567	-375,0	11004	-350,4	13621	-369,9
Todas as misturas	13480	-307,0	13376	-317,6	10872	-301,3	13448	-313,4

Observaram-se coeficientes de determinação da ordem de 0,90 nas frequências de 10 Hz e 5 Hz, e entre 0,85 a 0,95 na frequência de 1 Hz. Desenhou-se o Diagrama de *Black* (Figura 5.68) e o diagrama de *Cole-Cole* (Figura 5.69), com base nos valores relativos às duas frequências mais altas e agrupados por tipo de betume.

Verifica-se que existe um bom ajuste global entre as duas grandezas, para cada tipo de betume, confirmando-se que o módulo de deformabilidade aumenta com a redução do ângulo de fase, e vice-versa. A relação no diagrama de *Black*, foi ajustada com base em todos os valores registados nas duas frequências.

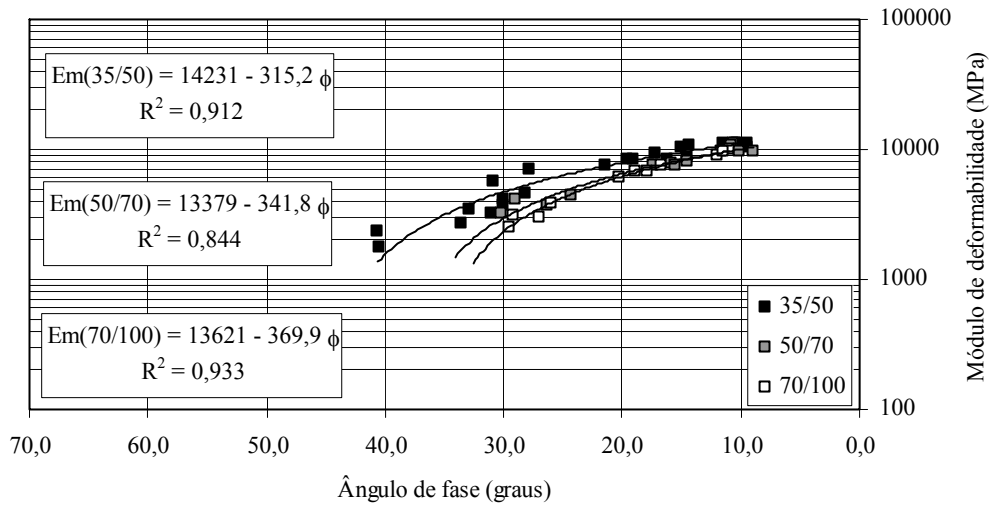


Figura 5.68 – Representação da relação entre o módulo de deformabilidade e o ângulo de fase no diagrama de *Black*, para frequências de 10 Hz e 5 Hz (misturas MBLB)

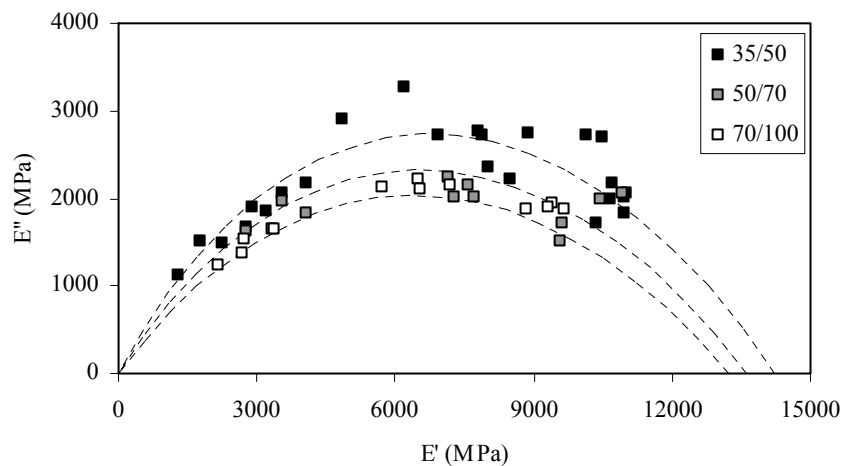


Figura 5.69 – Representação no diagrama de *Cole-Cole*, para os três tipos de betume, frequências de 10 Hz e 5 Hz (misturas MBLB)

Em face dos resultados, pode dizer-se que, neste aspecto, não se observam diferenças significativas entre as misturas de referência e as misturas recicladas, podendo o ângulo de fase, para frequência de aplicação das cargas entre 5 Hz e 10 Hz, ser estimado a partir do módulo de deformabilidade, em MPa, pelas expressões:

$$E_m = 14231 - 315,2 \phi \Leftrightarrow \phi = 45,1 - 0,00317 E_m \quad [\text{betume } 35/50] \quad (5.35)$$

$$E_m = 13379 - 341,8 \phi \Leftrightarrow \phi = 39,1 - 0,00293 E_m \quad [\text{betume } 50/70] \quad (5.36)$$

$$E_m = 13621 - 369,9 \phi \Leftrightarrow \phi = 36,8 - 0,00270 E_m \quad [\text{betume } 70/100] \quad (5.37)$$

5.4.2 Resistência à fadiga

Na análise dos resultados dos ensaios de fadiga, seguiu-se a metodologia geral ou clássica, ajustando os valores medidos a uma equação do tipo $\epsilon = A.N^B$. Representam-se na Figura 5.70 as leis de fadiga das misturas produzidas com betume 35/50 e na Figura 5.71 as leis das restantes misturas.

Nos gráficos, por uma questão de clareza de leitura, não se mostram os pares de valores que permitiram o ajuste. No entanto, essa informação pode ser consultado no Anexo II, onde se apresentam os resultados de forma detalhada para cada uma das misturas. Determinou-se ainda a extensão de tracção necessária para que haja rotura do material ao fim de um milhão de ciclos, designada por ϵ_6 . Os parâmetros de todas as leis de fadiga (A e B) e o parâmetro ϵ_6 , obtidos pelo método geral e pelo método da energia dissipada adaptado, indicam-se no Quadro 5.24.

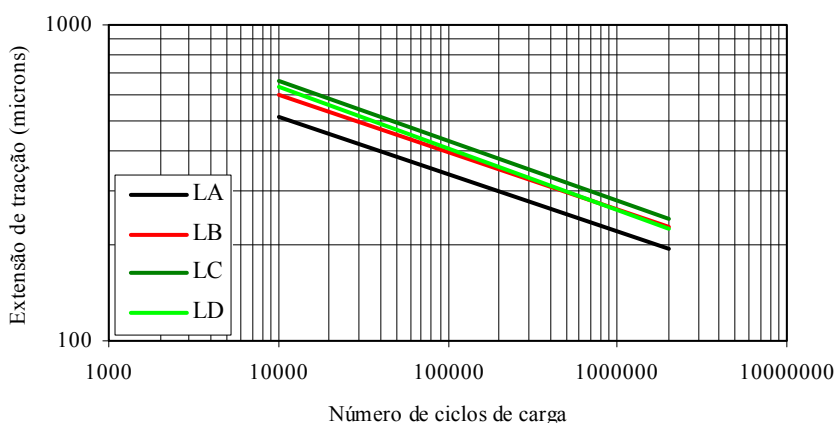


Figura 5.70 – Representação gráfica das leis de fadiga das misturas LA, LB, LC e LD

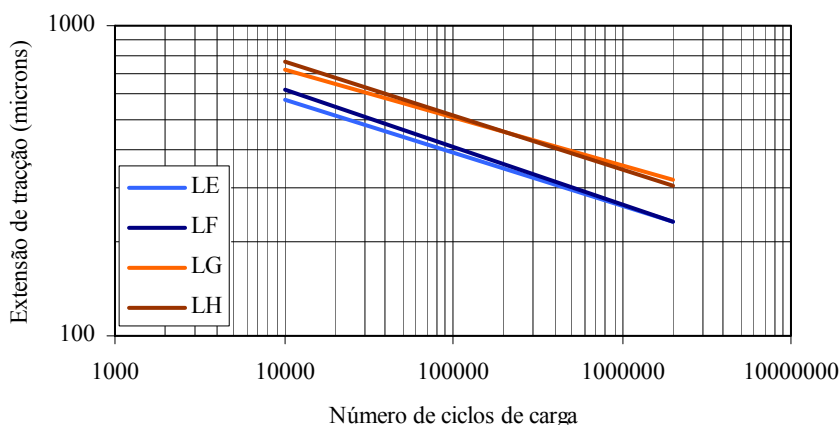


Figura 5.71 – Representação gráfica das leis de fadiga das misturas LE, LF, LG e LH

Quadro 5.24 – Parâmetros das leis de fadiga das misturas MBLB e extensão de tracção necessária correspondente a um milhão de ciclos

Mistura	Método geral ou clássico			Método da energia dissipada adaptado		
	A	B	ϵ_6 (microns)	A	B	ϵ_6 (microns)
LA	2717,2	-0,181	223	1810,3	-0,143	251
LB	3198,4	-0,182	259	2480,8	-0,160	274
LC	3797,6	-0,189	279	3535,2	-0,181	289
LD	3924,6	-0,197	258	4049,8	-0,202	249
LE	2743,0	-0,170	262	1973,8	-0,140	284
LF	3492,5	-0,187	264	5280,1	-0,221	249
LG	3026,3	-0,155	356	2292,3	-0,129	385
LH	3826,5	-0,174	346	2379,7	-0,131	389

As misturas recicladas a quente compactadas em laboratório (Figura 5.72) apresentam um comportamento à fadiga idêntico ou mesmo melhor que a respectiva mistura de referência (LA). Observa-se ainda que o comportamento das misturas produzidas com betume 70/100 (LG e LH), por conduzirem a um ligante final menos endurecido, supera claramente o desempenho das restantes em termos de comportamento à fadiga.

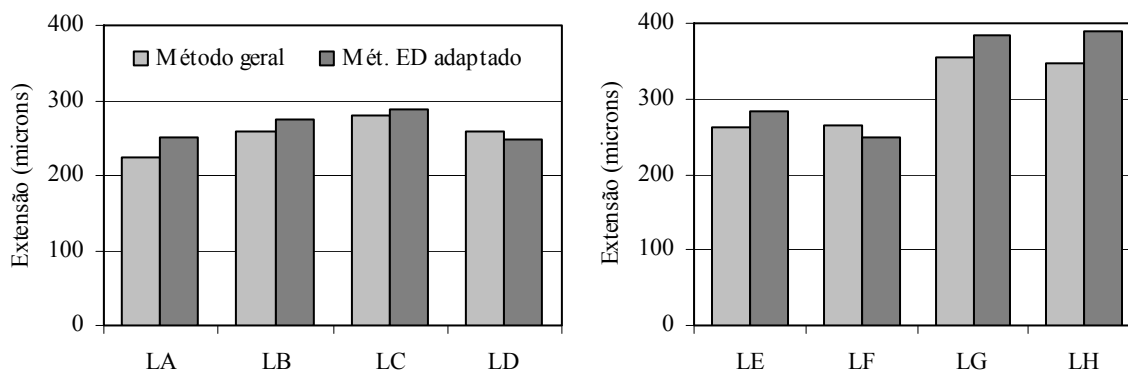


Figura 5.72 – Representação gráfica da extensão de tracção para um milhão de ciclos (misturas MBLB), obtida pelo método geral e pelo método da energia dissipada adaptado

À semelhança do que se observou nos módulos de deformabilidade e pelos mesmos motivos, o comportamento das misturas compactadas em laboratório com betume 35/50 também é superior ao das misturas correspondentes dos trechos experimentais. Regra geral, para os três tipos de betume, não se identificam diferenças significativas entre as taxas de reciclagem comuns (30% e 40%). Fica entretanto por esclarecer porque razão a mistura LA apresenta um comportamento à fadiga um pouco inferior. Uma das hipóteses mais forte será a do material fresado afinal apresentar uma percentagem de betume superior à considerada, o que melhoraria o comportamento das misturas que o incluem.

5.4.3 Resistência à deformação permanente

A caracterização à deformação permanente das misturas MBLB fez-se recorrendo apenas a ensaios de compressão uniaxial, com aplicação de cargas repetidas, que se desenrolaram nas condições de temperatura e carregamento antes referidas. Obtiveram-se as curvas médias de deformação axial permanente que se representam nas Figuras 5.73 e 5.74.

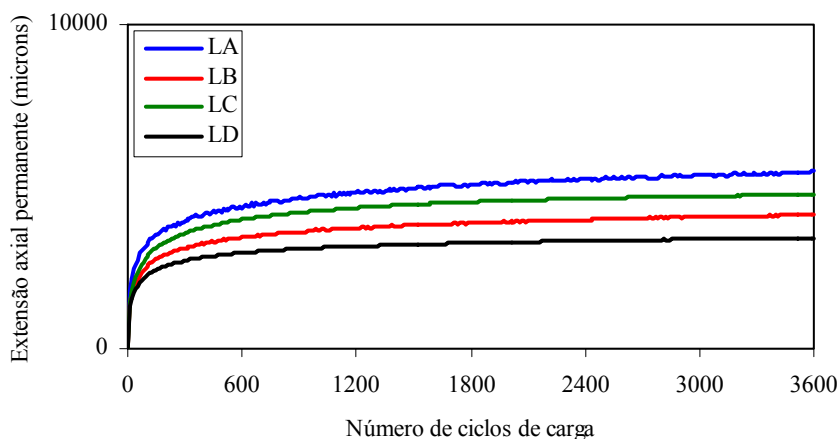


Figura 5.73 – Evolução da extensão axial permanente em ensaio de compressão uniaxial de cargas repetidas (misturas LA, LB, LC e LD)

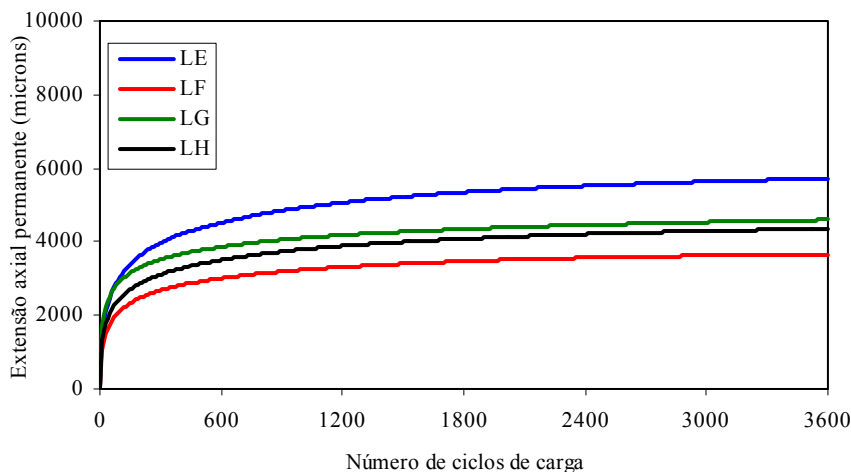


Figura 5.74 – Evolução da extensão axial permanente em ensaio de compressão uniaxial de cargas repetidas (misturas LE, LF, LG e LH)

Seguindo a metodologia de interpretação descrita neste capítulo, determinaram-se os parâmetros indicados no Quadro 5.25 que têm o significado habitual. As curvas de deformação permanente evidenciam um comportamento à deformação permanente que melhora ligeiramente com o aumento da taxa de reciclagem. As misturas produzidas com os betumes mais brandos apresentam um desempenho idêntico ao das misturas produzidas com o

betume 35/50 (Figuras 5.75 a 5.77) e os resultados acabam por estar directamente relacionados com as características de deformabilidade das misturas.

Quadro 5.25 – Resumo dos resultados das misturas MBLB, obtidos nos ensaios de compressão uniaxial de cargas repetidas

Mistura	ϵ_{3600} (microns)	Vdef (mm/minlo)	S_N (MPa)	E_r (MPa)	A	B	$\epsilon_{1000,calc}$ (microns)
LA	5467	0,188	27,4	439,0	1655	0,148	4613
LB	4111	0,132	36,5	614,0	1374	0,138	3562
LC	4757	0,119	31,5	623,8	1478	0,148	4112
LD	3411	0,078	44,0	640,5	1346	0,118	3030
LE	5722	0,187	26,2	532,3	1378	0,180	4762
LF	3667	0,093	40,9	657,5	1058	0,157	3134
LG	4597	0,132	32,6	522,6	1648	0,129	4010
LH	4358	0,138	34,4	579,3	1204	0,162	3682

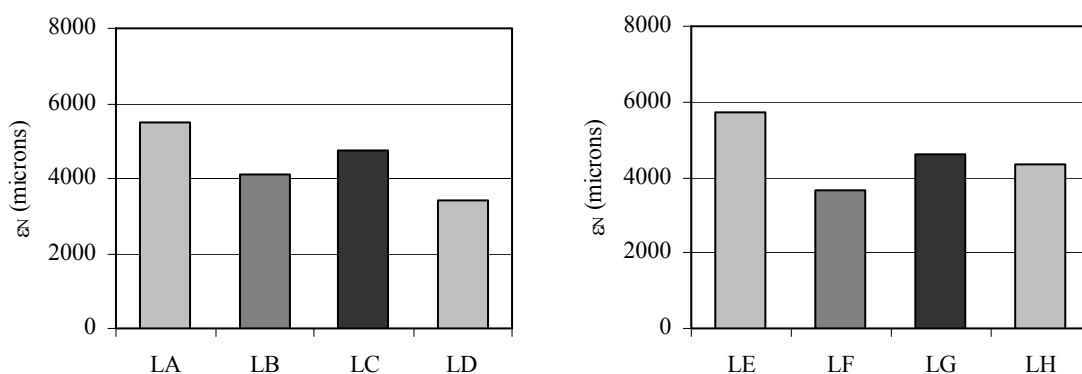


Figura 5.75 – Representação gráfica da extensão axial permanente das misturas MBLB, medida em ensaio de compressão uniaxial de cargas repetidas

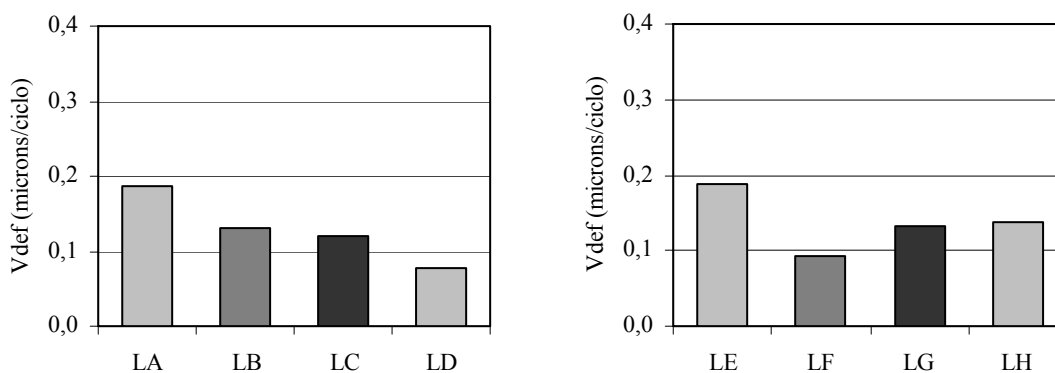


Figura 5.76 – Representação gráfica da velocidade de deformação das misturas MBLB, medida em ensaio de compressão uniaxial de cargas repetidas

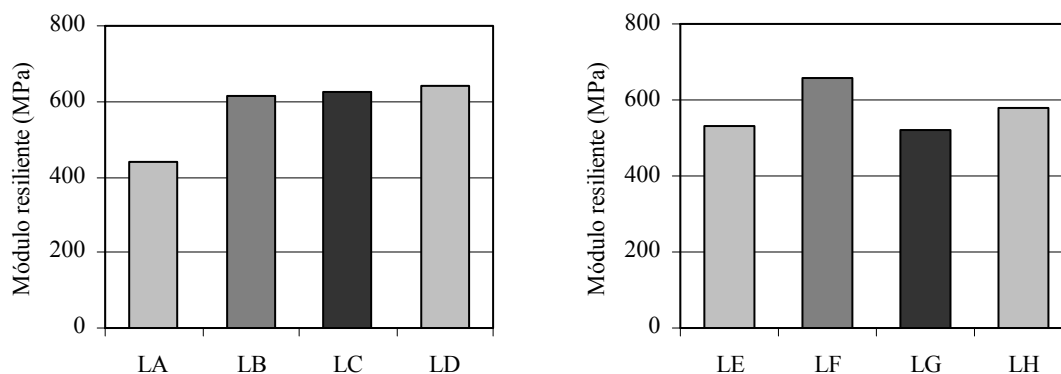


Figura 5.77 – Representação gráfica do módulo resiliente das misturas MBLB, medido em ensaio de compressão uniaxial de cargas repetidas

5.4.4 Análise global do desempenho das misturas

Além das inferências feitas a respeito de cada uma das características mecânicas, aplicou-se a metodologia com base em indicadores de desempenho, proposta na análise das misturas MBTE, com vista à análise global e comparativa do desempenho das misturas MBLB. Tomando como referência as características de resistência à fadiga e à deformação permanente das misturas obtiveram-se os resultados indicados no Quadro 5.26.

Quadro 5.26 – Resumo dos indicadores de desempenho das misturas MBLB

Mistura	ID _{FD}	ID _{DP}	ID
LA	0,63	0,41	0,52
LB	0,73	0,59	0,66
LC	0,78	0,66	0,72
LD	0,72	1,00	0,86
LE	0,74	0,42	0,58
LF	0,74	0,84	0,79
LG	1,00	0,59	0,80
LH	0,97	0,57	0,77

Os valores dos indicadores assim determinados, representados graficamente na Figura 5.78, confirmam o bom desempenho das misturas recicladas a quente comparativamente ao da mistura de referência (LA). Observa-se ainda que as duas misturas produzidas com o betume 70/100 (LG e LH) se encontram entre as que exibem o melhor desempenho global para as taxas de reciclagem mais elevadas. Verifica-se assim que, para incorporações de material fresado mais altas, a opção por um betume de adição mais brando, além dum bom comportamento à fadiga, consegue-se um desempenho à deformação permanente satisfatório mesmo sem aumento da rigidez da mistura.

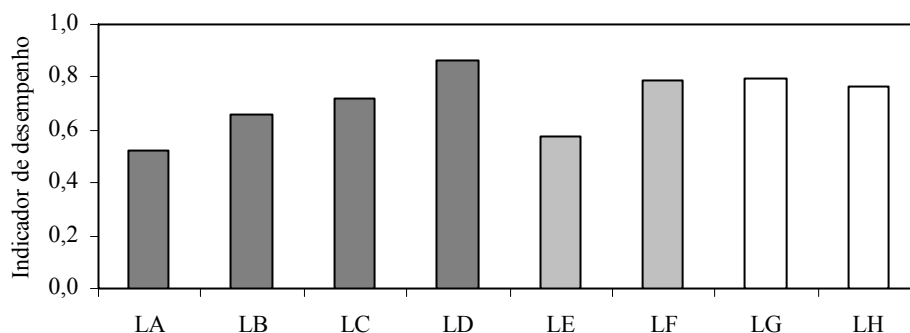


Figura 5.78 – Representação gráfica do indicador de desempenho das misturas MBLB

5.5 Apresentação e Análise dos Resultados das Misturas BDLB

5.5.1 Módulos de deformabilidade e ângulos de fase

Os ensaios decorreram nas condições habituais e conduziram aos valores de módulos de deformabilidade e ângulos de fase das misturas BDLB⁷ indicados no Quadro 5.27. Na Figura 5.79 representam-se os valores medidos a 10 Hz.

Quadro 5.27 – Módulos de deformabilidade e ângulos de fase das misturas BDLB

Mistura	Temperatura (°C)	Módulo de deformabilidade (MPa)			Ângulo de fase (graus)		
		10 Hz	5 Hz	1 Hz	10 Hz	5 Hz	1 Hz
M1	15	9209	7899	5541	22,1	23,5	22,7
M2	15	8885	7598	5316	25,0	26,3	25,1
R1	15	11703	10424	7586	17,2	18,0	17,7
R2	15	12317	11017	7991	18,4	19,2	19,0
M1	25	4784	4017	2722	31,5	31,6	28,6
M2	25	4472	3667	2498	31,8	31,8	27,6
R1	25	7508	6384	4438	24,5	25,2	23,7
R2	25	6981	5792	4066	27,2	28,0	26,8
M1	40	1854	1603	1207	37,5	32,4	21,9
M2	40	1609	1415	1156	39,1	35,4	25,0
R1	40	2982	2453	1758	34,4	33,8	26,4
R2	40	2668	2213	1636	34,7	31,9	25,9

- Influência da taxa de reciclagem e da percentagem de betume

À semelhança das misturas de macadame produzidas em laboratório (MBLB), também aqui a influência da incorporação de material fresado é bem visível. As misturas recicladas (R1 e R2) apresentam módulo de deformabilidade mais elevado que as misturas de referência, qualquer que seja a temperatura ou frequência de ensaio. A percentagem de betume influencia ligeiramente o módulo de deformabilidade verificando-se, nos dois conjuntos de misturas, uma redução deste parâmetro com o aumento da percentagem de betume.

⁷ Betão betuminoso produzido e compactado em laboratório conforme designação adoptada no Capítulo 4 (Quadro 4.21, página 126).

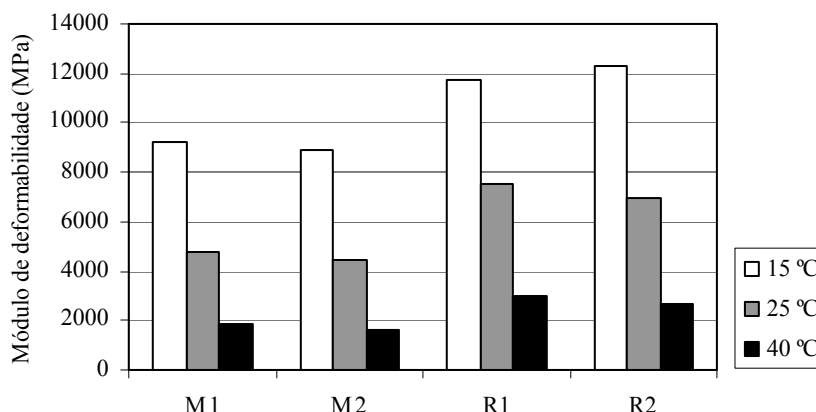


Figura 5.79 – Representação dos valores do módulo de deformabilidade das misturas BDLB, medidos a 10 Hz

- Influência das condições de ensaio

Tomou-se como referência a frequência de 10 Hz e interpretaram-se os resultados, comparando os módulos medidos a 5 Hz (Em5) e a 1 Hz (Em1), com o módulo de deformabilidade medido a 10 Hz (Em10). Na Figura 5.80 representam-se os conjuntos de valores medidos nos 36 ensaios (4 misturas, 3 temperaturas, 3 provetes/temperatura) com as misturas BDLB. Indicam-se ainda as respectivas leis de ajuste do tipo $Em = A (Em10)^B$. À semelhança das misturas antes estudadas, também aqui as relações entre Em5 e Em10 e entre Em1 e Em10, conduzem a ajustes muito satisfatórios e independentes da temperatura de ensaio e da composição da mistura.

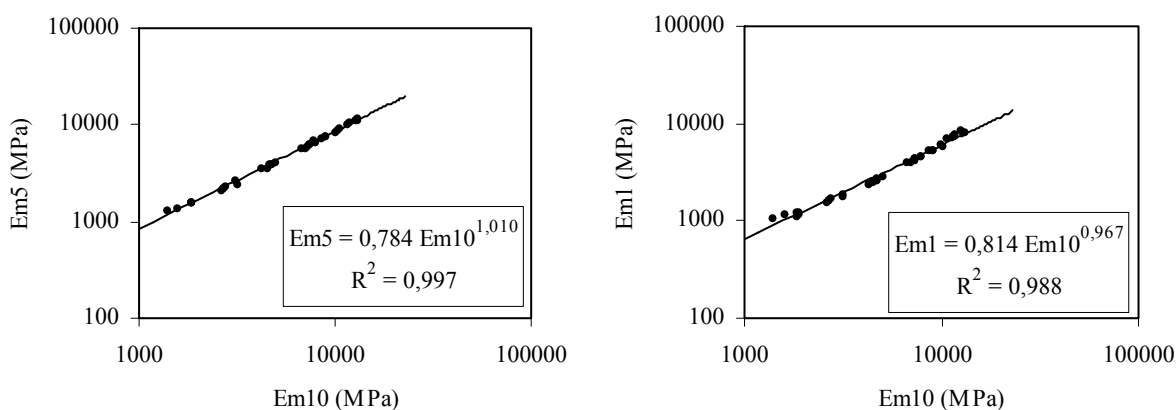


Figura 5.80 – Relação entre os módulos de deformabilidade das misturas BDLB a 5 Hz (Em5) e a 1 Hz (Em1) e o módulo de deformabilidade a 10 Hz (Em10)

Fez-se a mesma análise em termos de temperatura, tomando como referência o módulo de deformabilidade medido a 25°C (Em25). Interpretaram-se os resultados, comparando os módulos de deformabilidade medidos a 15°C (Em15) e a 40°C (Em40), com o módulo de

deformabilidade obtido à temperatura de referência. Na Figura 5.81 representam-se os pares de valores médios (4 misturas e 3 frequências de ensaio) e ainda as respectivas leis de ajuste.

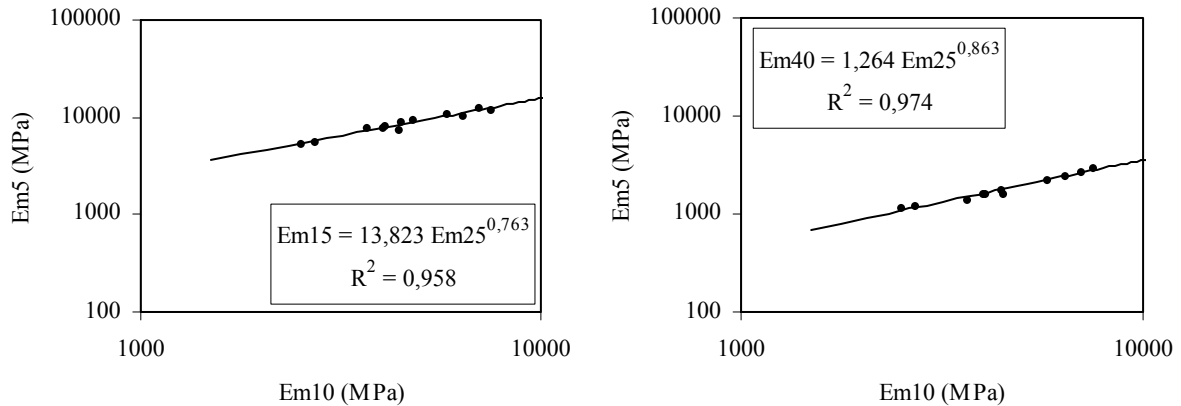


Figura 5.81 – Relação entre os módulos de deformabilidade das misturas BDLB a 15°C (Em15) e 40°C (Em40) e o módulo de deformabilidade a 25°C (Em25)

- Relação entre o módulo de deformabilidade e o ângulo de fase

Nas misturas BDLB a relação entre o módulo de deformabilidade e o ângulo de fase é aproximadamente linear. Analisaram-se todos os pares de valores (Em , ϕ) e estudou-se a relação entre o módulo de deformabilidade e o ângulo de fase. No Quadro 5.28 indicam-se os parâmetros de regressão linear para as diferentes frequências.

Quadro 5.28 – Parâmetros de ajuste da relação linear entre o módulo de deformabilidade e o ângulo de fase

Misturas	10 Hz		5 Hz		10 Hz + 5 Hz	
	A	B	A	B	A	B
M1, M2	20908	-548,4	19918	-474,0	19677	-486,6
R1, R2	21061	-564,3	21078	-526,3	20463	-519,5
Todas as misturas	20396	-494,2	20789	-548,8	20312	-511,4

Observaram-se coeficientes de determinação da ordem de 0,95 nas frequências de 10 Hz e 5 Hz. Desenhou-se o Diagrama de *Black* (Figura 5.82) e o diagrama de *Cole-Cole* (Figura 5.83), com base nos valores relativos às duas frequências mais altas e agrupados por tipo de betume. Na frequência mais baixa a relação entre o módulo de deformabilidade e o ângulo de fase não é linear. Nestas condições, para o betão betuminoso pode estimar-se o ângulo de fase em função da do módulo de deformabilidade pela expressão (5.38).

$$Em = 20312 - 511,4 \phi \Leftrightarrow \phi = 39,7 - 0,00196 Em \quad (5.38)$$

Verifica-se que existe um bom ajuste global entre as duas grandezas confirmando-se que o módulo de deformabilidade aumenta com a redução do ângulo de fase, e vice-versa. A relação

no diagrama de *Black*, foi ajustada com base em todos os pares de valores registados nas duas frequências.

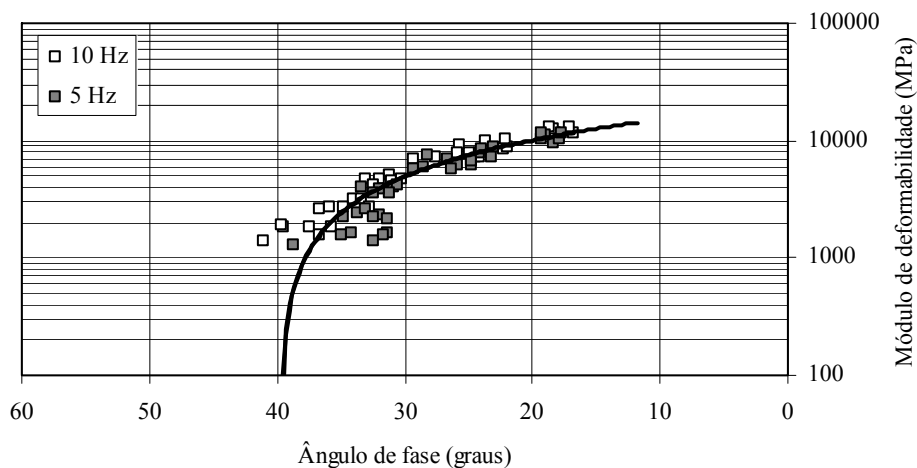


Figura 5.82 – Representação da relação entre o módulo de deformabilidade e o ângulo de fase no diagrama de *Black*, para frequências de 10 Hz + 5 Hz (misturas BDLB)

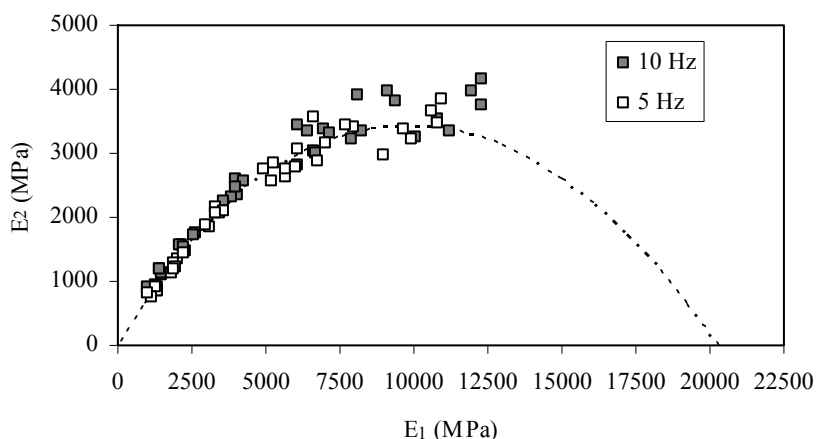


Figura 5.83 – Representação no diagrama de *Cole-Cole*, para as frequências de 10 Hz + 5 Hz (misturas BDLB)

5.5.2 Resistência à fadiga

No Quadro 5.29 apresenta-se uma síntese dos parâmetros das leis de fadiga e na Figura 5.84 a correspondente representação gráfica. Os resultados, em termos de comportamento à fadiga, estão na linha do que era esperado. Tomando como referência a extensão correspondente a um milhão de ciclos de carga (Figura 5.85) regista-se um melhor desempenho à fadiga com o aumento da percentagem de betume nas misturas recicladas e também na mistura de referência. De resto não se notam diferenças significativas entre as misturas recicladas e as misturas sem incorporação de material fresado.

Quadro 5.29 – Parâmetros das leis de fadiga das misturas BDLB e extensão correspondente a um milhão de ciclos

Mistura	Método geral ou clássico			Método da energia dissipada adaptado		
	A	B	ϵ_6 (microns)	A	B	ϵ_6 (microns)
M1	12443,1	-0,265	320	11087,5	-0,254	334
M2	5472,9	-0,198	355	4979,1	-0,184	393
R1	4163,8	-0,191	298	4795,6	-0,198	310
R2	3720,0	-0,169	360	4653,6	-0,182	379

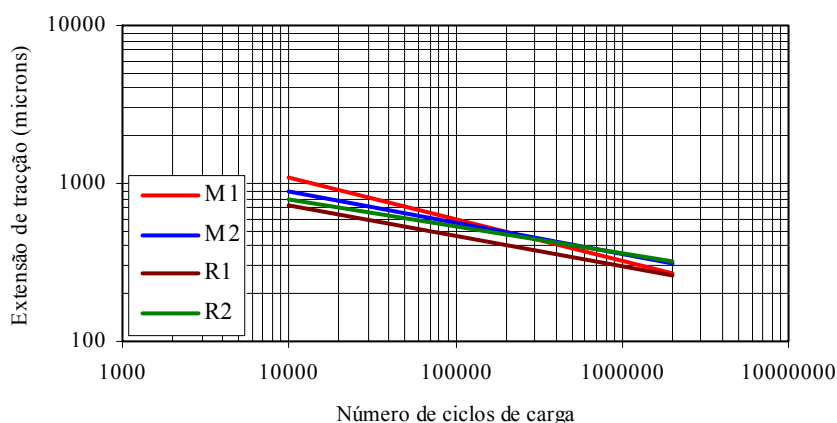


Figura 5.84 – Representação das leis de fadiga das misturas BDLB

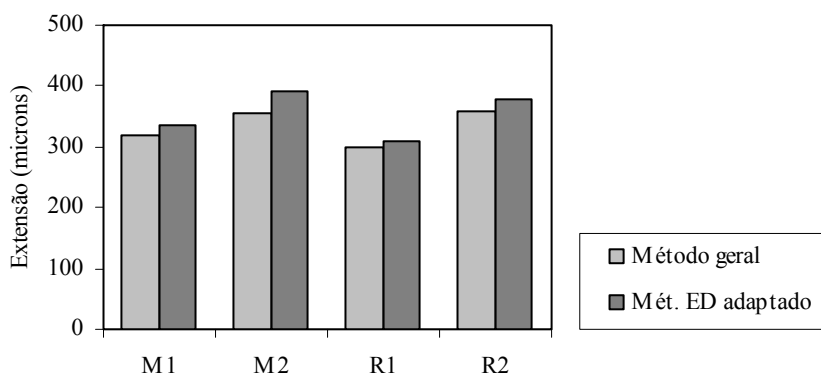


Figura 5.85 – Representação da extensão correspondente a um milhão de ciclos (BDLB)

Tal como já se tinha verificado em misturas de macadame aplicadas nos trechos experimentais, também nestas misturas o comportamento à fadiga melhora com o aumento da percentagem de betume, podendo verificar-se (Figura 5.86) que, nesta matéria, a taxa de reciclagem não têm grande influência no desempenho da mistura

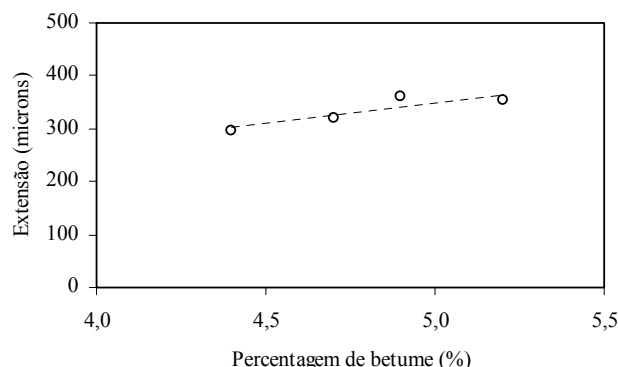


Figura 5.86 – Relação entre a extensão correspondente a um milhão de ciclos e a percentagem de betume (misturas BDLB)

5.5.3 Resistência à deformação permanente

Os resultados em termos de deformação permanente (Quadro 5.30) são coerentes com as características de deformabilidade das misturas. Com o aumento da percentagem de betume regista-se, nas misturas um aumento da velocidade de deformação e da deformação permanente (Figura 5.87 e 5.88).

Quadro 5.30 – Resumo dos resultados obtidos com as misturas BDLB, em ensaios de compressão uniaxial de cargas repetidas

Mistura	ϵ_{3600} (microns)	Vdef (mm/ciclo)	S_N (MPa)	E_r (MPa)	A	B	$\epsilon_{1000,calc}$ (microns)
M1	13151	0,795	11,4	297,4	2269	0,211	9773
M2	15019	1,043	10,0	336,9	2409	0,220	11043
R1	9325	0,434	16,1	500,5	1977	0,194	7535
R2	17144	1,001	8,7	442,3	2169	0,259	12940

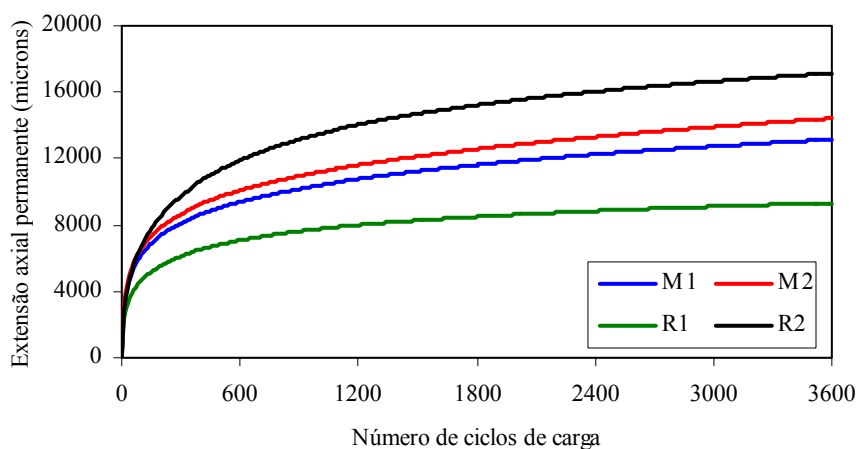


Figura 5.87 – Evolução da extensão axial permanente em ensaio de compressão uniaxial de cargas repetidas (misturas BDLB)

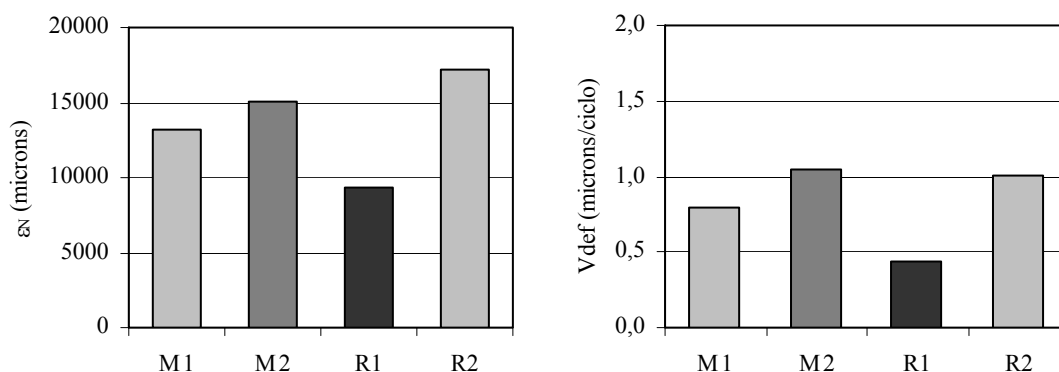


Figura 5.88 – Extensão axial permanente e velocidade de deformação das misturas BDLB

5.5.4 Análise global do desempenho das misturas

Aplicando a metodologia com base em indicadores de desempenho, usada nas misturas MBTE e MBLB, obtiveram-se os resultados do Quadro 5.31. Tratando-se de uma mistura em que à partida o comportamento à deformação permanente é fundamental, atribuiu-se um peso de 2/3 ao indicador de desempenho à deformação permanente. Os valores a que se chegou, representados graficamente na Figura 5.89, confirmam o bom desempenho das misturas recicladas a quente comparativamente ao das misturas de referência (M1 e M2).

Quadro 5.31 – Resumo dos indicadores de desempenho das misturas BDLB

Mistura	ID_{FD}	ID_{DP}	ID
M1	0,89	0,55	0,66
M2	0,99	0,42	0,61
R1	0,83	1,00	0,94
R2	1,00	0,43	0,62

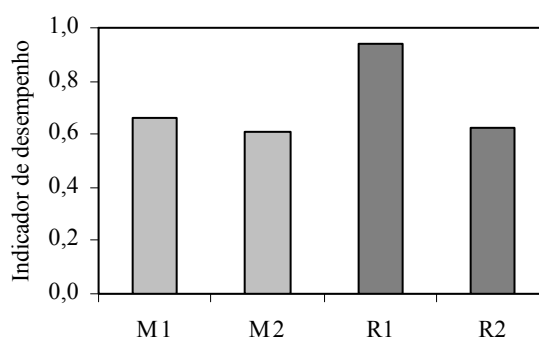


Figura 5.89 – Representação gráfica do indicador de desempenho das misturas BDLB

5.6 Considerações Finais

Nas misturas recicladas aplicadas nos trechos experimentais seria de esperar um aumento do módulo de deformabilidade com o incremento da incorporação de material fresado, devido à maior rigidez do ligante final. Nestas misturas mediram-se valores em média apenas 6% acima dos das misturas de referência. Porém, tal não deixa de ser encorajador tendo em conta que as misturas recicladas a quente apresentaram bons indicadores em termos de resistência conservada e bom comportamento mecânico.

As misturas MBTE recicladas exibiram um bom comportamento à fadiga, traduzido em valores do parâmetro ϵ_6 em média 28% acima do obtido nas misturas sem incorporação de material fresado. O mesmo se pode dizer a respeito da resistência à deformação permanente. Por exemplo, a velocidade média de deformação, medida no ensaio de compressão uniaxial, foi em média 24% inferior à registada nas misturas de macadame normal.

No caso das misturas produzidas em laboratório, os resultados a que chegou estiveram na linha do que se esperava. As misturas recicladas apresentaram um comportamento idêntico ou melhor que o da mistura sem incorporação de material fresado, não só em termos das características mecânicas, mas também ao nível da influência das condições de ensaio e da composição das misturas nos resultados obtidos.

Em laboratório foi necessário aquecer o material fresado. Por essa razão, as misturas produzidas e compactadas em laboratório apresentaram módulo de deformabilidade tanto mais elevado quanto maior a incorporação de material fresado. Em comparação com as misturas sem material fresado, mediram-se módulos de deformabilidade em média 28% acima nas misturas MBLB. O melhor desempenho destas misturas, comparativamente ao das misturas aplicadas nos trechos experimentais, veio confirmar a vantagem das técnicas de reciclagem com incorporação do material fresado aquecido comparativamente aos processos de mistura com introdução do fresado a frio.

As misturas MBLB com incorporação de material fresado, tal como as aplicadas nos trechos experimentais, regra geral, exibiram um melhor comportamento à fadiga (com o parâmetro ϵ_6 em média 30% acima do obtido nas leis de fadiga das misturas de referência) e à deformação permanente (traduzido numa velocidade média de deformação 33% inferior). No caso das misturas BDLB as leis de fadiga obtidas conduziram a um valor médio do parâmetro ϵ_6 apenas 3% inferior ao das misturas de referência e velocidade de deformação no ensaio de compressão uniaxial em média 22% abaixo do medido nas misturas tradicionais.

As características de deformabilidade das misturas recicladas, quer as aplicadas nos trechos quer as produzidas em laboratório, parecem ser influenciadas de forma idêntica pelas condições de ensaio. No que respeita à percentagem de betume, as misturas recicladas

estudadas com diferentes teores de ligante, apresentam variações nas características de deformabilidade, de resistência à fadiga e à deformação permanente idênticas às das misturas de referência. As misturas mostram um melhor comportamento à fadiga com o aumento da percentagem de betume e, regra geral, as mais ricas em betume exibem pior comportamento à deformação permanente.

As misturas MBLB produzidas com betumes mais brandos apresentaram características de deformabilidade e de fadiga em consonância com a menor rigidez do ligante final. Todavia, apesar de módulos de deformabilidade ligeiramente inferiores, o seu comportamento à deformação permanente não ficou aquém do das misturas produzidas com betume mais duro, o que conjugado com o melhor desempenho à fadiga (principalmente no caso do betume 70/100) vem reforçar a vantagem de considerar a adição de betumes mais brandos em misturas produzidas com taxas de reciclagem mais elevadas.

As misturas compactadas em laboratório apresentaram um desempenho que veio confirmar que as misturas recicladas a quente com incorporação de fresado são confiáveis, pois apresentam um desempenho satisfatório quando comparado com o das misturas tradicionais.

5.7 Referências Bibliográficas

- Capitão, S. (2003). “Caracterização Mecânica de Misturas Betuminosas de alto Módulo de Deformabilidade”. Tese de Doutoramento, Departamento de Engenharia Civil da F.C.T. da Universidade de Coimbra, 2 vol., Coimbra.
- CEN (2001). “Bituminous mixtures – test methods for hot mix asphalt – Part 25: Cyclic Compression test”. EN 12697- 25, European Committee for Standardization, Bruxelas.
- CEN (2002). “Bituminous mixtures – test methods for hot mix asphalt – Part 22: *Wheel Tracking*”. EN 12697-22, European Committee for Standardization, Bruxelas.
- CEN (2003). “Bituminous mixtures – test methods for hot mix asphalt – Part 25: Resistance to fatigue”. EN 12697- 25, European Committee for Standardization, Bruxelas.
- Momm, L. (2005). “Preparação de Misturas de Concreto Asfáltico de Módulo Elevado”. Actas do XIII CILA - Congresso Ibero-Latinoamericano del Asfalto, CD Ed., Costa Rica.
- Rowe, G. e Bouldin, M. (2000). “Improved techniques to evaluate the fatigue resistance of asphaltic mixtures”, 2nd Eurasphalt & Eurobitume Congress, Book 1, EAPA e Eurobitume, Barcelona, pp. 754-763.
- Van Dijk, W. e Viser, W. (1977). “The energy approach to fatigue for pavement design”, Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 46, AAPT, pp. 1- 40.

6 ORIENTAÇÕES PARA A RECICLAGEM A QUENTE EM CENTRAL

6.1 Considerações Iniciais

A Figura 6.1 ilustra o que pode ocorrer num pavimento flexível com deformações permanentes (cavados de rodeira), após a entrada em serviço, quando se aplica uma camada de reforço sem proceder à fresagem. Situação idêntica poderá verificar-se quando se aplica uma camada de reforço num pavimento com fendilhamento generalizado sem fresagem e não prevê uma solução que evite a propagação do fendilhamento (se aplicável).

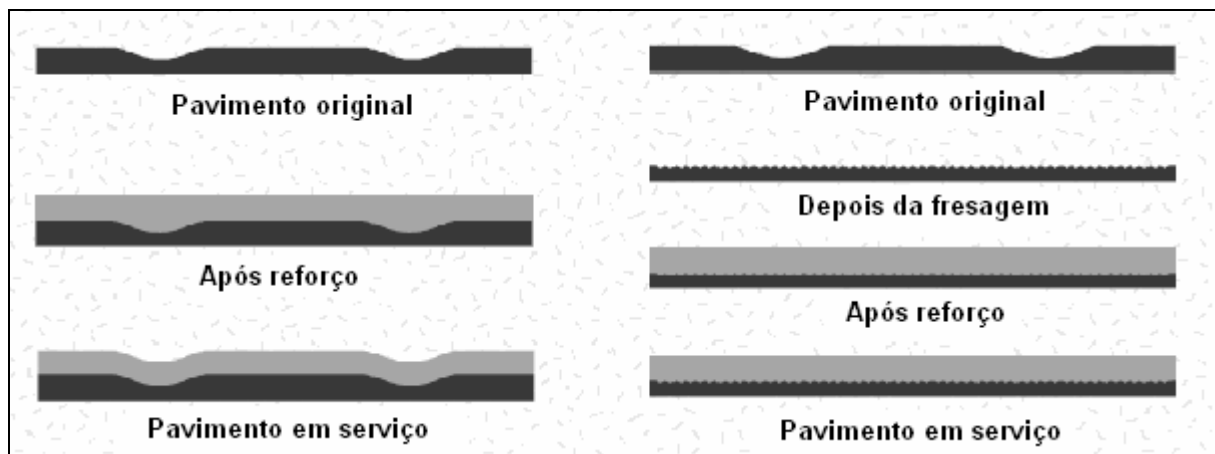


Figura 6.1 – Esquema das soluções de reabilitação com aplicação de camada de reforço sem fresagem e com fresagem (adaptado de Brock, 2003)

Acresce ainda que, optando pela fresagem à profundidade adequada, o material fresado poderá entrar num novo ciclo de vida sendo reciclado por incorporação na camada de reforço. Por outro lado, as misturas betuminosas constam da Lista Europeia de Resíduos, publicada na Portaria n.º 209/2004 de 3 de Março, fazendo parte do seu Capítulo 17. Neste incluem-se outros resíduos de construção e demolição. Esta portaria visa principalmente a uniformização da identificação e classificação dos resíduos e das operações de eliminação e valorização dos resíduos promovendo, por exemplo, a sua reciclagem.

Nesse sentido, foi recentemente publicada documentação normativa relativa à reciclagem de misturas betuminosas a quente em central – a especificação E 472 (LNEC, 2006) – e que constitui um guia para este tipo de reciclagem. Nesta especificação são definidas as condições

gerais de utilização, a forma de identificar o material fresado, o campo de aplicação, as propriedades e requisitos mínimos, a formulação das misturas e o controlo de qualidade.

As técnicas de reciclagem podem e devem constituir uma efectiva alternativa às soluções de reabilitação estrutural tradicionais. Martinho e Picado Santos (2005) apresentaram resultados de análise SWOT (*Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats*), tendo por base os pontos fortes (*Strengths*), os pontos fracos (*Weaknesses*), as oportunidades (*Opportunities*) e as ameaças (*Threats*), de cada uma das oito alternativas de reciclagem descritas no Capítulo 2.

Na Figura 6.2 mostra-se o mapa de posicionamento proposto pelos autores. Verifica-se, assim, que a reciclagem a quente em central (R8 na figura) e as reciclagens *in situ* a frio com cimento ou com betume-espuma são as técnicas mais fortes e com potencial de continuação de sucesso em Portugal Continental.

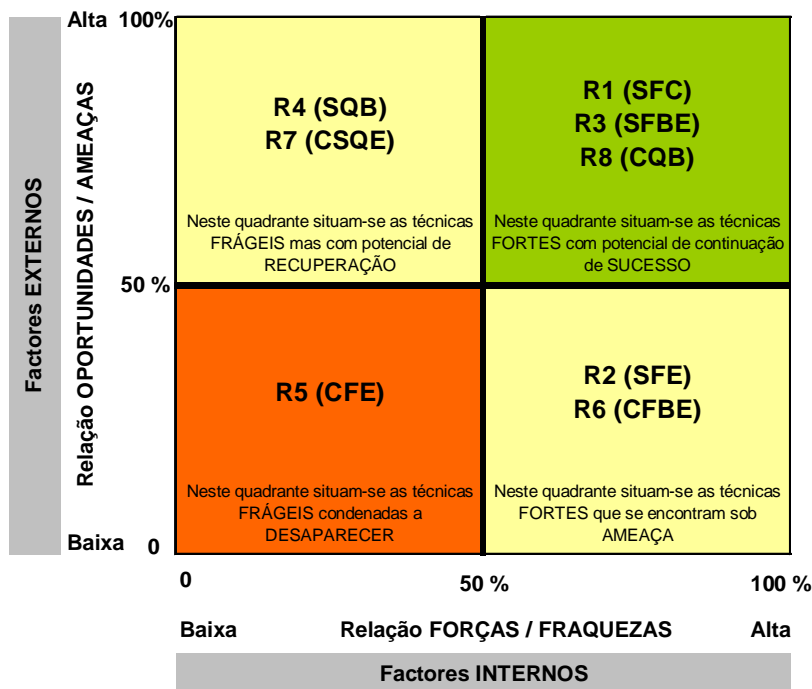


Figura 6.2 – Mapa de posicionamento das alternativas de reciclagem na análise SWOT (Martinho e Picado-Santos, 2005)

Ora, sendo a reciclagem a quente em central uma das técnicas com previsível crescimento de utilização em Portugal, num futuro próximo, e tendo entretanto havido novos desenvolvimentos sobre o assunto, nomeadamente a publicação da referida especificação E 472 (LNEC, 2006), que constitui o primeiro documento de referência a nível nacional em matéria de reciclagem a quente, neste capítulo apresentam-se algumas orientações para a reciclagem a quente em central.

Começa-se por abordar a questão do tratamento e caracterização do material fresado, fazendo referência aos seguintes aspectos: obtenção e armazenamento; identificação e classificação; campo de aplicação e exigências de conformidade. De seguida trata-se a formulação das MBRQ, sendo proposto um método de formulação adaptável às actuais condições tecnológicas portuguesas. São ainda descritos alguns aspectos a levar em conta no fabrico, na aplicação e no controlo de qualidade das misturas.

Enquadrou-se ainda, na parte final deste capítulo, uma breve análise económica em que se comparam soluções tradicionais de reabilitação e alternativas com aplicação de MBRQ. Os resultados da análise acabam por confirmar a redução de custos de execução proporcionada pela reciclagem a quente em central.

Em algumas das secções, muito do que se refere segue de perto a especificação E 472 (LNEC, 2006). Por fim, ressalve-se que algumas das orientações não foram integralmente seguidas nos trabalhos experimentais por, na altura, não estarem em vigor ou por não se enquadrarem nos objectivos do trabalho.

6.2 Tratamento e Caracterização do Material Fresado

6.2.1 Obtenção e armazenamento

O material a incorporar nas MBRQ poderá ser proveniente da fresagem das camadas degradadas de pavimentos rodoviários flexíveis, de restos de misturas betuminosas ou ainda de placas retiradas dos pavimentos depois de desagregadas (Figura 6.3). Como se justificou no Capítulo 2, adoptou-se a designação de material fresado em qualquer dos casos por ser a mais comumente usada em Portugal e pelo facto de mesmo no caso de britagem das placas retiradas do pavimento o material final apresentar o mesmo aspecto.



Figura 6.3 – Fresagem de camadas de pavimento e placas de pavimento (Ibarra, 2003)

Se o material fresado for suficientemente homogéneo e apresentar dimensão máxima adequada à mistura que se pretende produzir, como geralmente acontece quando provém da fresagem, não será necessária a sua britagem. Nesta situação recomenda-se a colocação duma grelha à entrada da unidade de alimentação do material fresado e dum crivo de rejeição de material de maiores dimensões (torrões). Estes dispositivos deverão ser idênticos aos usados na central de fabrico das MBRQ aplicadas nos trechos experimentais (ver Figura 4.19 do Capítulo 4, na página 129).

Noutras situações poderá justificar-se a britagem do material fresado antes do armazenamento para fabrico. Se a dimensão máxima do material fresado não for excessiva, a britagem poderá fazer-se mesmo durante a alimentação da central de fabrico, recorrendo a um britador secundário para reduzir e uniformizar a granulometria do material fresado (Figura 6.4).

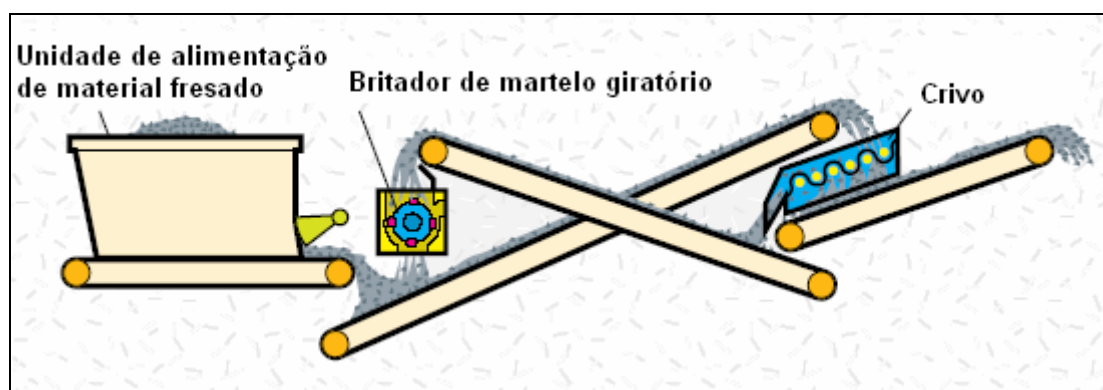


Figura 6.4 – Esquema do processo de alimentação de central com britagem do material fresado (adaptado de Brock, 2003)

Quando o material se apresentar em placas provenientes da demolição de pavimentos rodoviários flexíveis (Figura 6.3), será indispensável a sua britagem prévia. Para o efeito, existem centrais de britagem com um esquema de funcionamento idêntico ao das pedreiras e que permitem a separação do material em uma (Figura 6.5), duas (Figura 6.6) ou três fracções, sendo usual noutros países a separação em fracções de 0/12,5 mm e 12,5/25 mm (Brock, 2003). Nestas centrais de britagem existem dois britadores, um primário e um secundário, e crivos de separação. Alguns autores recomendam também a britagem e separação do material proveniente da fresagem quando se pretendem usar taxas de reciclagem mais elevadas (Ibarra, 2003).

Qualquer que seja o processo de obtenção do material fresado por britagem, deverá existir um dispositivo de detecção e eliminação de metais com funcionamento semelhante aos que existem nas centrais de britagem das pedreiras. Na E 472 é ainda referenciado que deverá ser despistada a existência de alcatrão no material fresado. Porém, o risco de existir alcatrão no material fresado é mínimo pois não tem sido usado em Portugal (Antunes *et al.*, 2006).

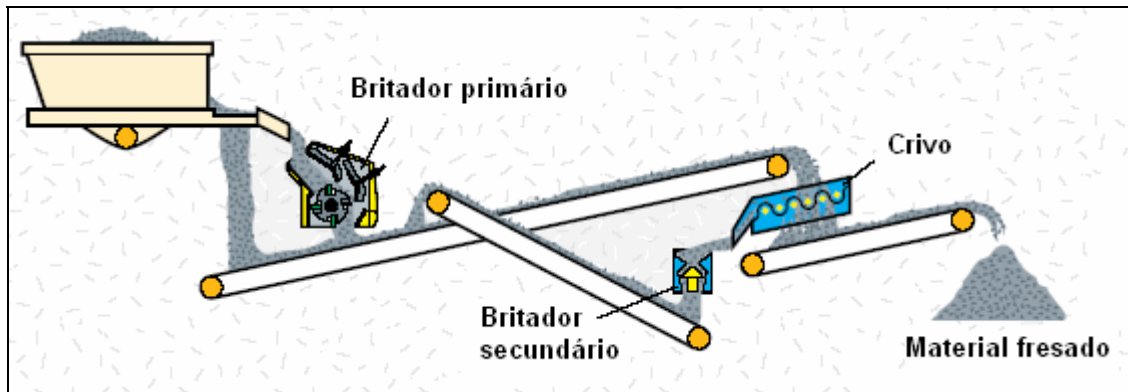


Figura 6.5 – Esquema do processo de britagem para obtenção do material fresado com determinada dimensão máxima (adaptado de Brock, 2003)

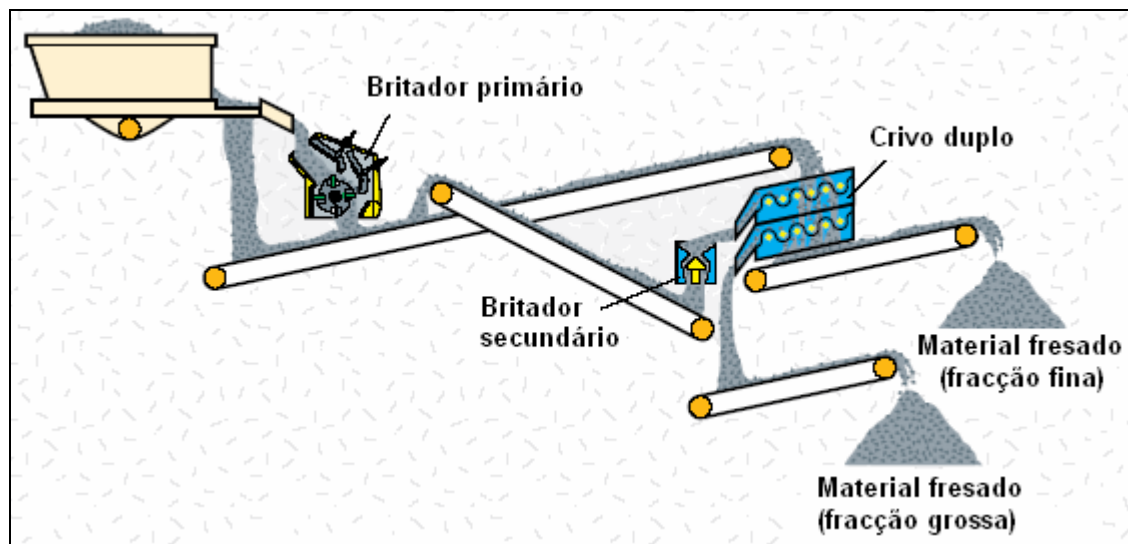


Figura 6.6 – Esquema do processo de britagem para obtenção do material fresado separado em duas fracções (adaptado de Brock, 2003)

O material fresado, independentemente da forma como se obtém, deverá ser armazenado em pilhas de características homogéneas, conforme a sua origem e colocando o material por camadas (Figura 6.7). A altura das pilhas não deverá exceder os 3,0 m de modo a evitar a segregação do material ou a aglomeração das partículas desagregadas (LNEC, 2006).

A humidade do material fresado, como se viu no Capítulo 2, obriga a um maior consumo de energia no fabrico das MBRQ. Este aspecto é particularmente importante quando o material fresado é introduzido a frio e aquecido pelo contacto com os agregados quentes, devendo, na medida do possível, minimizar-se o teor de humidade do material fresado. Para isso, as pilhas de fresado deverão ser colocadas de preferência em local coberto (para o proteger de água das chuvas e de temperaturas altas) e arejado para evitar a retenção de água (LNEC, 2006).



Figura 6.7 – Esquema das pilhas de armazenamento do material fresado por camadas e da introdução na unidade de alimentação (AIPCR, 2003)

6.2.2 Caracterização

A caracterização do material fresado já havia sido abordada na secção 3.3.4 do Capítulo 3, no âmbito da formulação das MBRQ. Tendo em vista a identificação e a classificação do material fresado e também a formulação das misturas, na E 472 é recomendada a determinação das propriedades do material fresado e dos seus constituintes (agregado e betume recuperado) que se resumem no Quadro 6.1.

Quadro 6.1 – Propriedades do material fresado e componentes – ligante e agregado – e respectivas normas de ensaio (adaptado de LNEC, 2006)

Material	Propriedade	Norma de ensaio
Material fresado	Presença de matéria estranha	EN 12697-42 (CEN, 2005-a)
	Granulometria	NP EN 933-1 (IPQ, 2000)
	Teor em água	EN 12697-14 (CEN, 2000-d)
	Percentagem de ligante	EN 12697-1 (CEN, 2000-a)
Ligante recuperado	Penetração a 25°C	EN 1426 (CEN, 1999-a)
	Temperatura de amolecimento	EN 1427 (CEN, 1999-b)
Agregado do fresado	Granulometria	NP EN 933-1 (IPQ, 2000)

O ligante envelhecido existente no material fresado poderá ser recuperado seguindo os procedimentos previstos na EN 12697-3 (CEN, 2000-b) ou na EN 12697-4 (CEN, 2000-c). De acordo com a EN 108-8 (CEN, 2005-b), as amostras de material fresado, uma por cada 500 toneladas e não menos de 5, devem ser preparadas de acordo com a NP EN 932-1 (IPQ, 2002).

Para taxas de reciclagem baixas (até 10% para mistura a aplicar em desgaste ou até 20% para camadas de regularização ou de base) será suficiente uma amostra por cada 2000 toneladas ou uma por pilha de material fresado (CEN, 2005-b).

6.2.3 Identificação e classificação

O material fresado pode ser identificado e classificado de acordo com a EN 13108-8 (CEN, 2005-b). Nesta norma, a identificação depende da granulometria do material fresado e do agregado constituinte e a classificação é feita em função da presença de matéria estranha e das características do ligante envelhecido recuperado.

Ao material fresado, designado *Reclaimed Asphalt* (RA) na norma, pode ser atribuída uma identificação do tipo U RA 0/D, sendo U a dimensão máxima do material fresado e D a dimensão máxima do agregado do material fresado (CEN, 2005-b). Por definição, D é a menor abertura da malha do peneiro com 100% de material agregado passado, e U corresponde ao maior dos valores: abertura da malha do peneiro com 85% de material fresado passado e $M/1,4$ com M igual à menor abertura do peneiro com 100% de material fresado passado. Tomando como referência esta regra de identificação, o material fresado usado nas misturas dos trechos experimentais (ver Figura 4.3 do Capítulo 4, página 108) seria identificado como 28 RA 0/19.

Na norma EN 108-8 (CEN, 2005-b) são propostas duas classificações, uma relativa ao material fresado dependente da presença de matéria estranha, avaliada segundo a EN 12697-42 (CEN, 2005-a), e outra aplicável ao ligante recuperado de acordo com as características fundamentais: penetração a 25°C e temperatura de amolecimento. Na avaliação da matéria estranha são considerados dois conjuntos. No grupo 1 incluem-se betão e produtos de betão, tijolo, materiais de sub-base (excluindo agregados naturais), argamassas e metais. No grupo 2 consideram-se materiais sintéticos, madeira e plásticos. De acordo com as percentagens de cada um dos grupos, definem-se as seguintes classes:

- a) Classe F1 - não mais de 1% de material do grupo 1 e não mais de 0,1% do grupo 2;
- b) Classe F5 - não mais de 5% de material do grupo 1 e não mais de 0,1% do grupo 2;
- c) Classe Fdec - não cumpre os limites anteriores, sendo os valores e a natureza da matéria estranha declarados.

Conhecidas as características do ligante recuperado, são definidas as seguintes classes:

- a) Classe P₁₅: ligante recuperado com penetração a 25°C maior ou igual a $10 \cdot 10^{-1}$ mm em todas as amostras e valor médio igual ou superior a $15 \cdot 10^{-1}$ mm;
- b) Classe S₇₀: ligante recuperado com temperatura de amolecimento inferior a 77°C em todas as amostras e valor médio igual ou inferior a 70°C;
- c) Classes Pdec ou Sdec: ligante com características diferentes das anteriores, sendo declarados os respectivos valores médios de penetração e de temperatura de amolecimento.

Ora, como a penetração e a temperatura de amolecimento, medidas indirectas da viscosidade, são dependentes, poderá usar-se apenas uma das duas classificações do betume recuperado.

6.2.4 Campo de aplicação e requisitos de conformidade

Em termos de aplicabilidade das MBRQ, na E 472 são consideradas duas possibilidades: a utilização em camada de desgaste ou em camadas de regularização e de base. A aplicação em camada de desgaste é recomendada apenas se o material fresado for da classe F1, o betume recuperado da classe P₁₅ ou S₇₀ e a taxa de reciclagem não exceder 10% (Quadro 6.2). A utilização de MBRQ em camadas de regularização ou de base é possível num número mais vasto de situações e para taxas de reciclagem até 50%.

Quadro 6.2 – Campo de aplicação e taxas de reciclagem máximas (LNEC, 2006)

Classificação de acordo com a EN108-8			Campo de aplicação	Taxa de reciclagem máxima
Material Fresado	Ligante recuperado			
Presença de matérias estranhas	Tipo de ligante	Características		
F1	Betume de Pavimentação (tradicional)	P ₁₅ ou S ₇₀	Camadas de desgaste	10%
			Camadas de regularização e de base	50%
F5	Betume de Pavimentação (tradicional)	P ₁₅ ou S ₇₀	Camadas de regularização e de base	25%
		P _{dec} ou S _{dec}	Camadas de regularização e de base	10%
	Betume Modificado de Pavimentação ou Betume Duro de Pavimentação	Natureza e propriedades declaradas	Camadas de regularização e de base	10%

Todavia, é aberta a possibilidade de se usarem taxas de reciclagem superiores às indicadas, desde que o estudo de formulação das misturas seja complementado com a caracterização do ligante final e com a avaliação das características mecânicas das misturas (LNEC, 2006), à semelhança do que se fez nos trabalhos experimentais. No que respeita a requisitos de conformidade, além do indicado no Quadro 6.2, o teor em água máximo do material fresado não deverá exceder 5% e a dimensão máxima, U, deverá respeitar o limite de 32 mm. Para taxas de reciclagem superiores a 20% na E 472 é recomendado que os agregados respeitem o previsto no caderno de encargos da obra, sendo as propriedades determinadas segundo a NP EN 13043 (IPQ, 2004). Em Espanha, a dimensão máxima admitida é de 25 mm e são consideradas tolerâncias de $\pm 0,4\%$ na percentagem de betume e de $\pm 4 \cdot 10^{-1}$ mm na penetração do betume recuperado (Ministerio de Fomento, 2001).

6.3 Formulação das Misturas

6.3.1 Nota introdutória

A formulação de misturas foi amplamente tratada no Capítulo 3. Nesta secção apresenta-se uma metodologia de formulação de MBRQ adaptável às actuais condições tecnológicas nacionais, que resultou da experiência adquirida durante a realização do trabalho e apresenta estrutura idêntica ao método de formulação de MBQ proposto por Picado-Santos (2005).

6.3.2 Método de formulação proposto

O método de formulação proposto é semelhante ao seguido nos trabalhos experimentais e descrito no Capítulo 3, sendo, no entanto, aberta a possibilidade de usar a prensa de corte giratória (PCG) ou o método de *Marshall* no estabelecimento da percentagem óptima de betume.

À semelhança doutras metodologias de formulação descritas no Capítulo 3, consideraram-se duas variantes: i) conhece-se à partida a taxa de reciclagem (a situação mais habitual) e não está definido a tipo de betume a usar (Método A); sabe-se qual o tipo de betume novo a usar, mas não está definida a taxa de reciclagem a adoptar (Método B).

Como se verá, as metodologias diferem sobretudo na fase de estabelecimento da composição de base. Os organogramas das duas variantes apresentam-se nas Figuras 6.8 e 6.9. Em ambos os casos a metodologia geral de formulação segue os passos definidos no Capítulo 3: caracterização dos materiais, estabelecimento da composição de base e selecção da fórmula para execução.

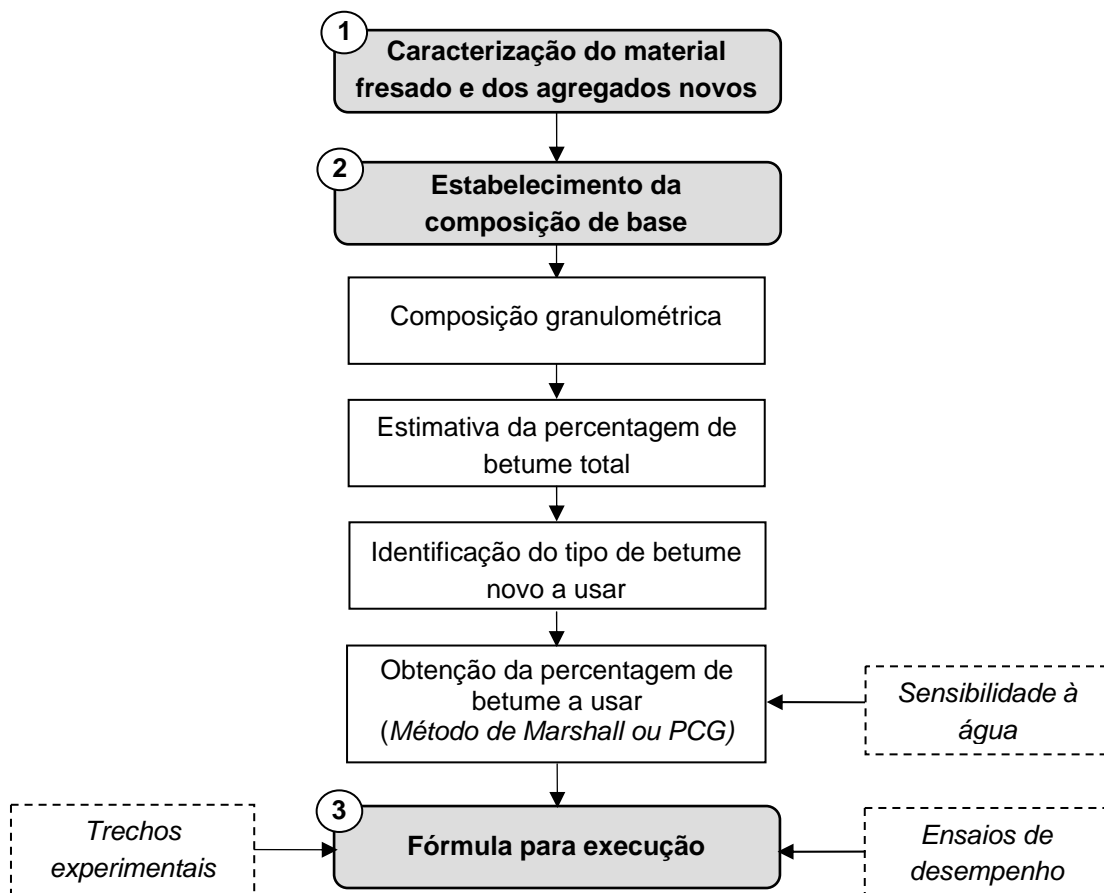


Figura 6.8 – Organograma da metodologia proposta para a formulação de misturas betuminosas recicladas a quente (Método A)

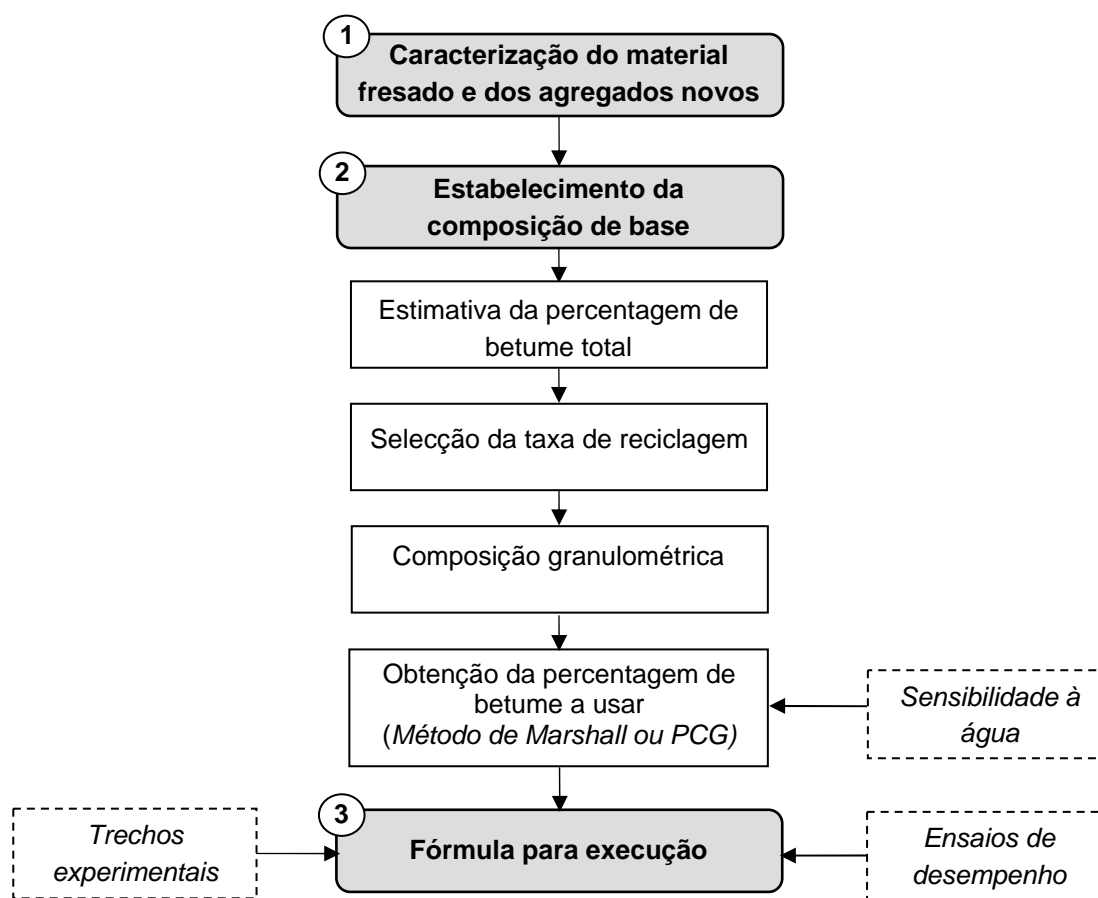


Figura 6.9 – Organograma da metodologia proposta para a formulação de misturas betuminosas recicladas a quente (Método B)

6.3.3 Caracterização dos materiais

Nas duas abordagens, além da habitual caracterização dos materiais novos, deverá proceder-se à caracterização do material fresado em termos de percentagem de ligante, pb_F , granulometria do agregado recuperado e penetração e temperatura de amolecimento do ligante recuperado. Para o efeito, podem seguir-se os procedimentos indicados na secção 6.2.3 a propósito da identificação e classificação do material fresado.

Em alternativa, propõe-se que sejam seguidos os procedimentos adoptados nos trabalhos experimentais. Por um lado, determina-se a percentagem de betume pelo método de incineração seguindo por exemplo a EN 12697-39 (CEN, 2004), sendo assim facilitada a avaliação da granulometria do agregado recuperado. Por outro lado, procede-se à recuperação do ligante do material fresado, em evaporador rotativo, e à respectiva determinação das características de base (penetração e temperatura de amolecimento). O material fresado e o ligante recuperado deverão satisfazer a exigências de conformidade antes referidas. Na segunda variante (Método B), além da caracterização do material fresado e dos agregados novos, faz-se também a caracterização do betume novo.

6.3.4 Estabelecimento da composição de base (Método A)

Nesta fase, começa-se pelo estudo da composição granulométrica tomando como referência o fuso especificado no caderno de encargos para a mistura pretendida. Aqui a proporção do agregado do material fresado é conhecida. Recomenda-se o estudo de duas granulometrias, uma mais grossa e outra mais fina, admitindo uma configuração semelhante à do fuso granulométrico, mas não tendo que o respeitar obrigatoriamente. Como se esquematiza na Figura 6.8, a seguir estima-se a percentagem de betume total, pb_R , usando a expressão com base na superfície específica (3.56, página 74) e respeitando a relação ponderal filer/betume (3.84, página 90). Pode então calcular-se a taxa de reciclagem de betume, TR_b , em função da percentagem de betume do material fresado, pb_F , da taxa de reciclagem, TR , e da percentagem de betume total, pb_R , através da expressão (3.29, página 45).

Para selecção do betume novo a usar, toma-se como referência a expressão (3.83, página 89) que permite determinar a penetração do ligante novo em função da penetração do ligante final, da penetração do ligante envelhecido e da TR_b . Na Figura 6.10 faz-se a representação gráfica dum exemplo com pen_F de $20 \cdot 10^{-1}$ mm, TR_b de 30% e ligante final do tipo 35/50. Neste caso, verifica-se que seria necessário um ligante novo com penetração entre $44,5 \cdot 10^{-1}$ mm e $74 \cdot 10^{-1}$ mm, o que seria realizável com um betume asfáltico 50/70.

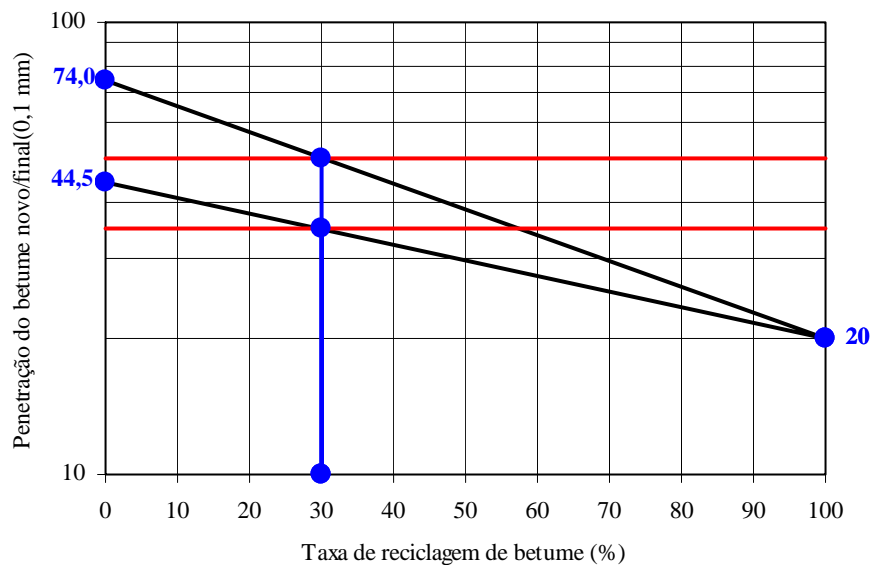


Figura 6.10 – Representação gráfica da determinação dos limites da penetração do betume novo a usar em mistura betuminosa reciclada a quente

Em alternativa, podem usar-se os ábacos da Figura 6.11 que traduzem a composição da penetração dos ligantes e permitem seleccionar o betume novo a adicionar conforme o ligante final pretendido (35/50 ou 50/70), a penetração do ligante recuperado e a taxa de reciclagem de betume considerada.

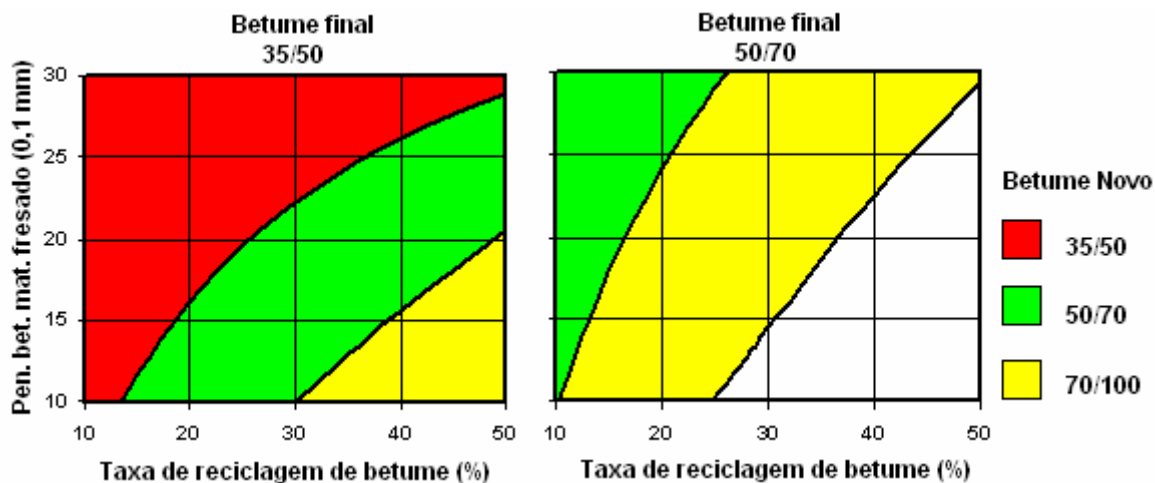


Figura 6.11 – Ábacos para selecção do tipo de betume a usar (método A)

Depois de identificado o tipo de betume a usar, segue-se a obtenção da percentagem óptima de betume a usar. Além do método empírico de Marshall, usado nos trabalhos desenvolvidos, propõe-se como alternativa a formulação volumétrica com a prensa de corte giratória (PCG). No final, deverá seleccionar-se uma das granulometrias (grossa ou fina) e avaliar a sensibilidade à água da MBRQ com a percentagem de betume a que se chegou.

6.3.5 Estabelecimento da composição de base (Método B)

Nesta variante não se conhece à partida a taxa de reciclagem, pelo que a sequência seguida na obtenção da composição de base difere da anterior. Primeiro estima-se a percentagem de betume da mistura, pb_R , tal como no método A e tomando como referência uma curva granulométrica correspondente ao fuso médio previsto no caderno de encargos. De seguida, determinam-se os limites da taxa de reciclagem de betume, usando a seguinte expressão:

$$TRb = \frac{\log(pen_R) - \log(pen_N)}{\log(pen_F) - \log(pen_N)} \quad (6.1)$$

onde,

- pen_R - penetração do ligante da mistura reciclada (dois limites);
- pen_N - penetração do betume novo;
- pen_F - penetração do ligante do material fresado.

Na Figura 6.12 representa-se graficamente a obtenção dos limites de TRb em função de pen_F, pen_N e dos limites de pen_R. No exemplo, sendo a penetração do ligante recuperado de $14 \cdot 10^{-1}$ mm, a penetração do ligante novo de $60 \cdot 10^{-1}$ mm e, pretendendo-se um ligante final do tipo 35/50, a taxa de reciclagem de betume poderá estar compreendida entre 12,5% e 37,0%.

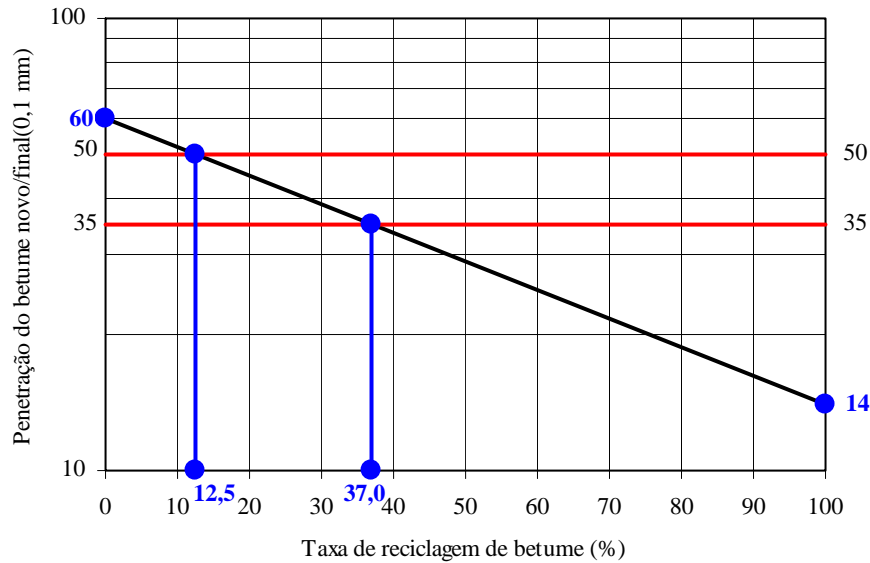


Figura 6.12 – Representação gráfica da determinação dos limites da taxa de reciclagem de betume a usar em mistura betuminosa reciclada a quente

Para obter os limites correspondentes da taxa de reciclagem, TR, usa-se a expressão (3.29, página 45) explicitando TR:

$$TR = TR_b \times \frac{pb_R}{pb_F} \quad (6.2)$$

Recorrendo ao exemplo da Figura 6.12, admitindo pb_F de 4,8% e pb_R estimada em 4,3%, a TR deveria estar compreendida entre 11% e 33%. A selecção da taxa de reciclagem deverá então ser feita dentro dos limites determinados e tendo em conta as condições de fabrico das misturas. Existindo condições para incorporar 30% de material fresado, obtinha-se TR_b de 33,5% e penetração do ligante final de $37 \cdot 10^{-1}$ mm. Depois de definida a TR faz-se o estudo da composição granulométrica, tal como no método A, considerando uma granulometria grossa e uma fina. Para terminar o estabelecimento da composição de base os procedimentos propostos são iguais aos do método A.

6.3.6 Fórmula para execução

Na última etapa faz-se a validação da composição de base, fazendo a sua transposição para trechos experimentais admitindo três percentagens de betume, a determinada, uma abaixo 0,5% e outra acima 0,5%. Por fim, além da verificação da conformidade das misturas relativamente ao previsto no caderno de encargos para a mistura em causa, deverá tomar-se a decisão final sobre a fórmula para execução em função dos resultados de ensaios de desempenho que permitam avaliar as características de deformabilidade das misturas e o seu comportamento à fadiga e à deformação permanente.

6.4 Centrais de Fabrico

Os processos de fabrico de MBRQ, em centrais contínuas ou descontínuas, foram descritos na secção 2.5.4 do Capítulo 2 (página 20 e seguintes). Porém, existem algumas recomendações e particularidades sobre o fabrico das misturas que convém realçar. Em termos de incorporação de material fresado, sem prejuízo do referido na secção 6.2.4, propõem-se os limites indicados no Quadro 6.3 e que se seleccionaram em função do descrito a este propósito no Capítulo 2 e dos resultados obtidos no fabrico das misturas aplicadas nos trechos experimentais em central descontínua (método a frio).

Quadro 6.3 – Taxa de reciclagem (TR) máxima em função do tipo de central de fabrico

Tipo de central/método	TR
Descontínua (método a frio)	≤ 40%
Descontínua (método a quente)	≤ 70%
Descontínua (método <i>recyclelean</i>)	≤ 35%
Contínua de fluxos paralelos	≤ 35%
Contínua de fluxos contracorrente	≤ 50%
Contínua de tambor duplo	≤ 50%

Nesta matéria na E 472 são recomendadas TR entre 10% e 30% no fabrico em centrais descontínuas (método a frio), entre 10% a 50% em centrais contínuas (dependente do método de fabrico) e até 70% nas centrais descontínuas com aquecimento do material fresado.

Em Espanha, nas centrais descontínuas é recomendado que o material fresado seja aquecido em tambor secador paralelo (método a quente) para garantir um bom rendimento de produção e uma boa homogeneidade final da mistura. No fabrico em central contínua de fluxos paralelos a TR é limitada ao máximo de 25%, sendo dada preferência ao fabrico em centrais contínuas de fluxos contracorrente ou de tambor-duplo (Ministério de Fomento, 2001).

Em Portugal, uma das obras mais recentes com aplicação de MBRQ foi a “beneficiação/reforço do sublanço Pombal/Condeixa, da A1 - Auto-estrada do Norte”. Como exemplo, o caderno de encargos da obra previa os limites de incorporação de material fresado indicados no Quadro 6.4.

Quadro 6.4 – Valores máximos da taxa de reciclagem (Adaptado de Bragança e Pires, 2006)

Tipo de central/método	Tipo de mistura		
	MB _R	MBD _R	BD _R
Central descontínua (método a quente)	60%	50%	40%
Central contínua (fluxos contracorrente)	30%	25%	20%
Central descontínua (método a frio)	20%	15%	10%

Nos processos de fabrico em que o material fresado é aquecido quando em contacto com os agregados sobreaquecidos (método a frio), a temperatura de aquecimento dos agregados é consensualmente limitada a 275°C de modo a evitar a eventual inflamação do ligante do material fresado. Todavia, como se referiu no Capítulo 2, o ligante do material fresado ainda poderá apresentar alguns componentes combustíveis, pelo que aquele máximo deverá ser usado com algum cuidado visto que se trata dum valor muito acima da temperatura de inflamação dum betume normal. Por esta razão, nas centrais descontínuas (método a frio) deverá retardar-se a entrada do betume na unidade de mistura e promover primeiro uma mistura “em seco” do material fresado e dos agregados sobreaquecidos.

Tomando como referência a expressão (2.30, página 33), que regula o equilíbrio térmico no fabrico das MBRQ, determinou-se a temperatura de aquecimento dos agregados, T_a , para várias situações e admitindo valores médios de 5% de ligante final e material fresado com 5% de betume. Considerou-se ΔT_a igual a 5°C, humidade do material fresado até 5%, a variar de 1%, e temperatura da mistura final de 150°C.

No Quadro 6.5 indicam-se os resultados obtidos para taxas de reciclagem de 10% a 40%, temperatura máxima de 275°C e material fresado introduzido a frio (20°C). Sendo o material fresado seco e aquecido previamente (Quadro 6.6), é possível atingir taxas de reciclagem mais altas e com temperaturas exigidas para aquecimento dos agregados sempre abaixo dos 275°C.

Quadro 6.5 – Estimativa da temperatura de aquecimento dos agregados para temperatura final da mistura de 150°C e sendo o material fresado introduzido a frio (20°C)

Humidade do material fresado (%)	Temperatura de aquecimento dos agregados (°C)			
	TR = 10%	TR = 20%	TR = 30%	TR = 40%
0	175	194	219	251
1	179	202	233	273
2	182	210	246	-
3	186	219	260	-
4	190	227	274	-
5	193	235	-	-

Quadro 6.6 – Estimativa da temperatura de aquecimento dos agregados para temperatura final da mistura de 150°C e sendo o material fresado introduzido a quente

Temperatura do material fresado (°C)	Temperatura de aquecimento dos agregados (°C)			
	TR = 40%	TR = 50%	TR = 60%	TR = 70%
110	188	202	223	258
120	181	192	207	234
130	174	181	192	209
140	167	171	176	185

Seguindo a mesma metodologia, na Figura 6.13 mostra-se como a temperatura de aquecimento do material fresado condiciona de forma significativa a temperatura a que é necessário aquecer os agregados novos.

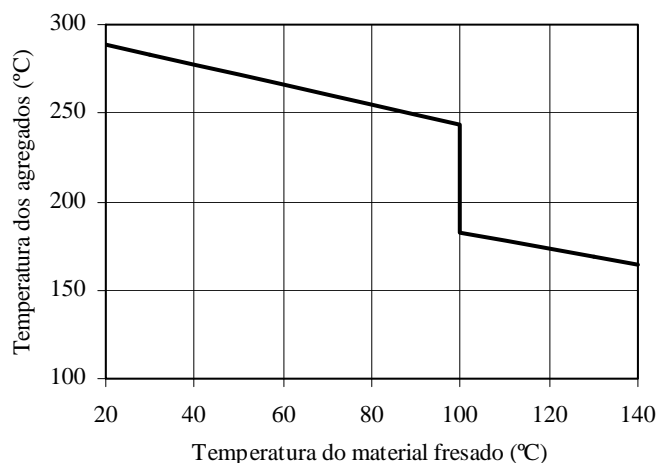


Figura 6.13 – Relação entre a temperatura de aquecimento dos agregados e a temperatura do material fresado (TR de 30%, mistura a 150°C e 5% de humidade do material fresado)

No que respeita ao material fresado, quando for promovido o seu aquecimento em tambor-secador paralelo, a temperatura não deverá exceder a temperatura de aquecimento do betume novo (LNEC, 2006).

6.5 Aplicação e Controlo de Qualidade

Na aplicação das misturas recicladas a quente são adoptados procedimentos semelhantes aos seguidos na aplicação das misturas a quente tradicionais. No controlo de qualidade do material fresado deverá ser feita uma verificação constante das suas propriedades, de modo a garantir a sua homogeneidade em termos de granulometria, das características granulométricas do agregado recuperado, da percentagem de betume e das características do ligante recuperado (LNEC, 2006).

A verificação sistemática das características do material fresado é fundamental. Na E 472 é recomendada a recolha de amostras com a frequência referida na secção 6.2.2, tal como previsto na EN 108-8 (2005-b) e a monitorização das suas propriedades para comparação com a fórmula para execução definida e, se necessário, a realização de alterações (LNEC, 2006).

Todavia, tendo em conta as reais condições tecnológicas nacionais, entende-se que a frequência de recolha prevista será exagerada, propondo-se uma maior flexibilidade em todo o

processo. Sugere-se uma avaliação das propriedades indicadas no Quadro 6.1 por cada 2000 toneladas se for feito um adequado tratamento prévio, procedendo a britagem que conduza a uma forte homogeneização do material fresado, e uma caracterização por cada 1000 toneladas nos restantes casos, desde que garantida uma adequada homogeneização do *stock* de fresados através de manipulação com *bulldozer* ou similar. No caso de incorporações baixas (até 10% em desgaste e até 20% em regularização ou base) será suficiente uma amostra por cada 5000 toneladas de material fresado.

Se as condições de obra o permitirem e existindo garantia de controlo da humidade do material fresado, poderá ser feita previamente toda a caracterização do material fresado para diferentes zonas do *stock* cumprindo a frequência de ensaios referida, de modo a assegurar a continuidade da produção.

O controlo de qualidade da mistura reciclada depois de aplicada deverá seguir os procedimentos habitualmente preconizados para as misturas tradicionais. Os resultados dos respectivos ensaios, realizados com a frequência prevista, deverão respeitar as tolerâncias e as restantes exigências estabelecidas no caderno de encargos da obra.

6.6 Breve Análise Económica

6.6.1 Nota introdutória

A reciclagem a quente em central, devido ao menor consumo de agregados novos e de betume que acarreta, conduz a uma redução de custos de execução comparativamente a uma solução de reabilitação tradicional em que se aplicam novas camadas betuminosas. Além disso, numa solução tradicional existem custos ambientais relacionados com o maior consumo de recursos naturais (agregados e petróleo bruto) e com a colocação do material fresado em depósito, constituindo um resíduo com custos ambientais (e outros) de eliminação.

Numa análise económica mais aprofundada poderiam ainda considerar-se os custos para os utentes devido às perturbações durante a execução e eventuais custos adicionais de conservação na rede rodoviária afectada durante a execução. Todavia, nas soluções de reabilitação (tradicional ou com reciclagem a quente), estes custos são idênticos.

Assim, nesta secção faz-se uma breve análise económica de soluções de reabilitação, tradicional ou com reciclagem a quente em central, considerando apenas as componentes dos custos relativos à execução e à fresagem, transporte para central ou para depósito do material fresado. Apesar de favorecerem a reciclagem a quente, os custos de ordem ambiental não serão considerados.

6.6.2 Casos de estudo

Tomando como referência as conclusões apresentadas por Martinho e Picado-Santos (2005), admitiu-se como exemplo a reabilitação dum pavimento flexível com espessura total das camadas betuminosas superior a 15 cm e pouco deformável (deflexão abaixo dos 500 μm), com fendilhamento a partir da superfície e para o qual a técnica de reciclagem a quente em central constitui a principal alternativa em Portugal Continental.

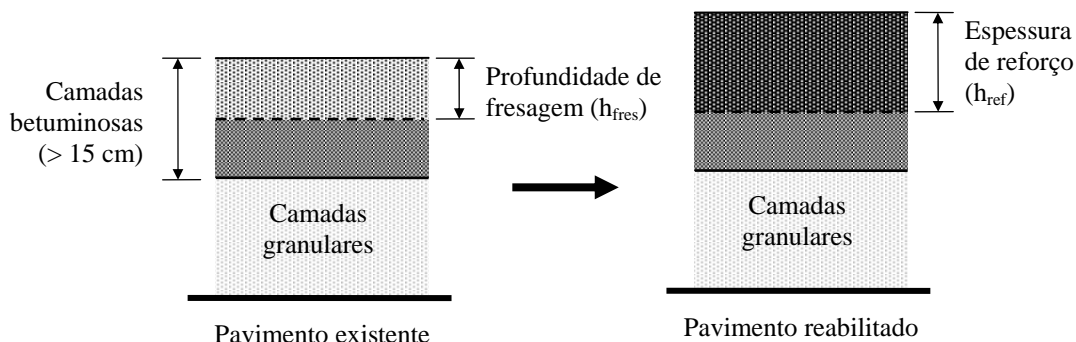


Figura 6.14 – Representação esquemática da estrutura-tipo considerada na análise

Na análise consideraram-se profundidades de fresagem entre 6 cm e 12 cm e quatro possíveis espessuras de reforço (12 cm, 14 cm, 16 cm e 18 cm). A espessura da camada de reforço depende de vários factores, sendo porém normal que exceda a profundidade de fresagem. Assim, analisaram-se casos com espessura de reforço, h_{ref} , compreendida entre $1,5 \times h_{fres}$ e $2,0 \times h_{fres}$, ou, o que é o mesmo:

$$\frac{1}{2} \times h_{ref} \leq h_{fres} \leq \frac{2}{3} \times h_{ref} \quad (6.3)$$

Resultaram assim, para as quatro espessuras de reforço, as catorze possíveis combinações (h_{ref} , h_{fres}) resumidas no Quadro 6.7.

Quadro 6.7 – Espessuras de reforço e profundidades de fresagem consideradas na análise

Espessura do reforço (cm)	Profundidade de fresagem (cm)						
	6	7	8	9	10	11	12
12	×	×	×				
14		×	×	×			
16			×	×	×	×	
18				×	×	×	×

Para cada uma das espessuras de reforço, estabeleceram-se cinco soluções de reabilitação do pavimento, duas tradicionais e três alternativas com recurso à reciclagem a quente em central:

Estrutura tradicional 1 (ET1): macadame betuminoso (MB) em regularização e betão betuminoso (BD) em desgaste;

Estrutura alternativa 1A (EA1A): macadame betuminoso reciclado a quente (MB_R) em regularização e betão betuminoso reciclado a quente (BD_R) em desgaste. Em face dos resultados alcançados entende-se como possível a aplicação de BD_R em camada de desgaste. Sendo tecnicamente viável, esta solução é a que permite um maior aproveitamento do material fresado disponível;

Estrutura alternativa 1B (EA1B): macadame betuminoso reciclado a quente (MB_R) em regularização e betão betuminoso (BD) em desgaste. Esta solução, mais conservadora, constitui uma segunda alternativa a ET1 mas em que, por razões de ordem técnica, se possam eventualmente colocar reservas à aplicação de BD_R em camada de desgaste;

Estrutura tradicional 2 (ET2): macadame betuminoso (MB) em regularização, betão betuminoso (BD) em subjacente e betão betuminoso drenante (BDD) em desgaste. Poderiam considerar-se outras soluções para camada de desgaste, como betão betuminoso rugoso, mas que não seriam muito diferentes em termos de custos.

Estrutura alternativa 2 (EA2): macadame betuminoso reciclado a quente (MB_R) em regularização, betão betuminoso reciclado a quente (BD_R) em subjacente e betão betuminoso drenante (BDD) em desgaste.

Estabeleceram-se as vinte soluções estruturais previstas na análise de custos que se indicam nos Quadros 6.8 e 6.9. Nas estruturas com desgaste em betão betuminoso drenante considerou-se uma contribuição desta camada para a capacidade estrutural do pavimento de 2 cm (50% da espessura prevista). Ainda neste caso, para um reforço de 12 cm, admitiu-se que uma camada de regularização de 10 cm terá o acabamento adequado à aplicação da camada drenante sem necessidade de aplicar betão betuminoso subjacente à camada de desgaste.

Quadro 6.8 – Soluções de reabilitação com camada de desgaste em betão betuminoso

Espessura do reforço (cm)	Estrutura tradicional 1 (ET1)	Estrutura alternativa 1A (ET1A)	Estrutura alternativa 1B (EA1B)
12	7MB + 5BD	$7MB_R + 5BD_R$	$7MB_R + 5BD$
14	9MB + 5BD	$9MB_R + 5BD_R$	$9MB_R + 5BD$
16	11MB + 5BD	$11MB_R + 5BD_R$	$11MB_R + 5BD$
18	13MB + 5BD	$13MB_R + 5BD_R$	$13MB_R + 5BD$

Quadro 6.9 – Soluções de reabilitação com camada de desgaste em betão betuminoso drenante

Espessura do reforço (cm)	Estrutura tradicional 2 (ET2)	Estrutura alternativa 2 (EA2)
12	10MB + 4BDD	10MB _R + 4BDD
14	7MB + 5BD + 4BDD	7MB _R + 5BD _R + 4BDD
16	9MB + 5BD + 4BDD	9MB _R + 5BD _R + 4BDD
18	11MB + 5BD + 4BDD	11MB _R + 5BD _R + 4BDD

As características mecânicas fundamentais das misturas betuminosas recicladas a quente, MBRQ, são idênticas ou melhores que as das misturas tradicionais. Por essa razão, ao considerar espessuras das estruturas de reabilitação com MBRQ iguais às das respectivas soluções tradicionais, as primeiras terão uma probabilidade de sobrevivência do pavimento reabilitado igual ou superior à das segundas.

6.6.3 Avaliação e apreciação dos custos das alternativas

Na estimativa dos custos das diferentes alternativas, pelas razões antes apontadas, consideraram-se apenas os custos da reabilitação directamente relacionados com a execução e os custos relativos à fresagem, transporte para central e/ou colocação em depósito do material fresado. Estes últimos custos admitem-se iguais para as partes do material fresado colocado em depósito ou incorporado nas misturas (transportado para central). Admite-se assim que a parcela relativa ao custo de deposição do material fresado sobranete será idêntica à parte adicional de tratamento do material fresado em central. Para o efeito, tomou-se como referência um custo médio de 20€por m³ de material fresado (Pereira e Picado-Santos, 2006).

Admitiu-se o estudo da reabilitação/reforço do pavimento dum troço de 10 km numa estrada de 2 × 2 vias, numa largura de 8 m da plena via por faixa de rodagem. A área de pavimento a reabilitar correspondente é de 160.000 m², obtendo-se as quantidades de material fresado e respectivos custos de fresagem e transporte para central/depósito indicados no Quadro 6.10.

Quadro 6.10 – Previsão das quantidades de material fresado e dos custos de fresagem e transporte do material fresado

Profundidade de fresagem (cm)	Quantidade de material fresado		Custo de fresagem e transporte
	(m ³)	(ton)	
6	9600	23040	192.000 €
7	11200	26880	224.000 €
8	12800	30720	256.000 €
9	14400	34560	288.000 €
10	16000	38400	320.000 €
11	17600	42240	352.000 €
12	19200	46080	384.000 €

Na avaliação dos custos de execução admitiram-se os custos unitários das misturas novas (MB, BD e BDD) indicados no Quadro 6.11 e que se fixaram em função das actuais condições de mercado e dos custos referidos por outros autores (Pereira e Picado-Santos, 2006; Barbosa, 2006; Moreira, 2005). No cálculo dos custos unitários das MBRQ admitidas (MB_R e BD_R) considerou-se que, em Portugal, embora possa existir alguma variabilidade no preço do petróleo bruto, o betume representa 60% do custo total duma mistura, os agregados 15% e a produção 25% (Pereira e Picado-Santos, 2006). Sendo idênticas as parcelas relativas ao custo de produção das misturas convencionais e recicladas, observa-se uma redução de custos devido ao menor consumo de materiais novos:

$$\text{Custo}(MB_R) = 0,60 \text{ €/m}^2/\text{cm} \times [0,60 \times (0,60 + 0,15) + 0,25] = \mathbf{0,42 \text{ €/m}^2/\text{cm}};$$

$$\text{Custo}(BD_R) = 0,70 \text{ €/m}^2/\text{cm} \times [0,70 \times (0,60 + 0,15) + 0,25] = \mathbf{0,54 \text{ €/m}^2/\text{cm}}.$$

Quadro 6.11 – Custos unitários das misturas consideradas na análise

Mistura	Custo (€/m ² /cm)
MB - Macadame betuminoso em camada de regularização	0,60
BD - Betão betuminoso em camada de desgaste	0,70
BDD - Betão betuminoso drenante	0,80
MB_R - Macadame betuminoso em regularização reciclado a quente com TR = 40%	0,42
BD_R - Betão betuminoso em desgaste ou subjacente, reciclado a quente com TR = 30%	0,54

Numa primeira análise consideraram-se apenas os custos associados à execução da reabilitação/reforço, tendo-se chegado aos custos indicados no Quadro 6.12 e às respectivas reduções de custo proporcionadas pelas alternativas com reciclagem a quente (Quadro 6.13). Observa-se uma redução média de custos de execução do reforço entre 19% e 27%.

Quadro 6.12 – Custos de execução das soluções de reabilitação

Espessura do reforço (cm)	Camada de desgaste em betão betuminoso			Camada de desgaste em drenante	
	ET1	EA1A	EA1B	ET2	EA2
12	1.232.000 €	902.400 €	1.030.400 €	1.472.000 €	1.184.000 €
14	1.424.000 €	1.036.800 €	1.164.800 €	1.744.000 €	1.414.400 €
16	1.616.000 €	1.171.200 €	1.299.200 €	1.936.000 €	1.548.800 €
18	1.808.000 €	1.305.600 €	1.433.600 €	2.128.000 €	1.683.200 €

Quadro 6.13 – Redução de custos de execução das alternativas com reciclagem a quente

Espessura do reforço (cm)	EA1A	EA1B	EA2
12	26,8%	16,4%	19,6%
14	27,2%	18,2%	18,9%
16	27,5%	19,6%	20,0%
18	27,8%	20,7%	20,9%
Redução média	27,3%	18,7%	19,8%

Englobando também a fresagem e o transporte do material fresado, os custos aumentam ligeiramente (Quadro 6.14) e registam-se reduções de custos mais baixas (Quadro 6.15), a oscilar entre 16% e 23% nas alternativas com reciclagem a quente.

Quadro 6.14 – Custos globais das soluções de reabilitação

Espessura (cm)		Camada de desgaste em betão betuminoso			Camada de desgaste drenante	
Reforço	Fresagem	Tradicional (1)	Alternativa (1)	Alternativa (2)	Tradicional (2)	Alternativa (3)
12	6	1.424.000 €	1.094.400 €	1.222.400 €	1.664.000 €	1.376.000 €
	7	1.456.000 €	1.126.400 €	1.254.400 €	1.696.000 €	1.408.000 €
	8	1.488.000 €	1.158.400 €	1.286.400 €	1.728.000 €	1.440.000 €
14	7	1.648.000 €	1.260.800 €	1.388.800 €	1.968.000 €	1.638.400 €
	8	1.680.000 €	1.292.800 €	1.420.800 €	2.000.000 €	1.670.400 €
	9	1.712.000 €	1.324.800 €	1.452.800 €	2.032.000 €	1.702.400 €
16	8	1.872.000 €	1.427.200 €	1.555.200 €	2.192.000 €	1.804.800 €
	9	1.904.000 €	1.459.200 €	1.587.200 €	2.224.000 €	1.836.800 €
	10	1.936.000 €	1.491.200 €	1.619.200 €	2.256.000 €	1.868.800 €
	11	1.968.000 €	1.523.200 €	1.651.200 €	2.288.000 €	1.900.800 €
18	9	2.096.000 €	1.593.600 €	1.721.600 €	2.416.000 €	1.971.200 €
	10	2.128.000 €	1.625.600 €	1.753.600 €	2.448.000 €	2.003.200 €
	11	2.160.000 €	1.657.600 €	1.785.600 €	2.480.000 €	2.035.200 €
	12	2.192.000 €	1.689.600 €	1.817.600 €	2.512.000 €	2.067.200 €

Quadro 6.15 – Redução de custos globais das alternativas com reciclagem a quente

Espessura do reforço (cm)	Fresagem (cm)	Alternativa (1)	Alternativa (2)	Alternativa (3)
12	6	23,1%	14,2%	17,3%
	7	22,6%	13,8%	17,0%
	8	22,2%	13,5%	16,7%
14	7	23,5%	15,7%	16,7%
	8	23,0%	15,4%	16,5%
	9	22,6%	15,1%	16,2%
16	8	23,8%	16,9%	17,7%
	9	23,4%	16,6%	17,4%
	10	23,0%	16,4%	17,2%
	11	22,6%	16,1%	16,9%
18	9	24,0%	17,9%	18,4%
	10	23,6%	17,6%	18,2%
	11	23,3%	17,3%	17,9%
	12	22,9%	17,1%	17,7%
Redução média		23,1%	16,0%	17,3%

Refira-se ainda que a solução ET2, com camada de desgaste em betão betuminoso drenante e restantes camadas com MBRQ, além das vantagens de ordem ambiental, apresenta um custo global em média 3,5% inferior à solução ET1 com camada de desgaste em betão betuminoso. Isto significa que a redução de custos, conseguida nas camadas com MBRQ na solução ET2 e com as taxas de reciclagem consideradas, permite a aplicação da camada de betão betuminoso drenante.

Por fim, enquanto nas soluções tradicionais 100% do material fresado é normalmente transportado para depósito, nas alternativas com reciclagem a quente as quantidades não recicladas são muito mais baixas (Quadro 6.16). Porém, indo um pouco mais além em termos de taxas de reciclagem poderia reciclar-se todo o material fresado na mesma obra.

Quadro 6.16 – Proporção de material fresado reciclado e não reciclado

Material fresado	EA1A	EA1B	EA2
Reciclado	55% - 75%	35% - 55%	45% - 65%
Não reciclado	25% - 45%	45% - 65%	35% - 55%

Nos exemplos analisados admitiu-se a necessidade de realizar fresagem em toda a área a reabilitar. No entanto, em alguns troços a fresagem não é necessária, o que significa que, no global, poderá observar-se um melhor aproveitamento do material fresado. Como exemplo, resumem-se no Quadro 6.17 os dados relativos à obra de reabilitação/reforço no troço Pombal/Condeixa da A1.

Quadro 6.17 – Resumo das quantidades de misturas recicladas e de material fresado da obra de “beneficiação/reforço no sublanço Pombal/Condeixa da A1” (Bragança e Pires, 2006)

Tipo de mistura	TR	Quantidade de mistura (ton)	Material fresado usado (ton)
MBD _R	25%	30242	7561
BD _R	20%	73382	14676
TOTAL		103624	22237

O pavimento existente, com camada de regularização em mistura betuminosa densa e betão betuminoso em desgaste, foi fresado numa profundidade média de 7 cm. A solução executada consistiu na aplicação de 7 cm de MBD_R (Mistura betuminosa densa reciclada a quente) com taxa de reciclagem de 25% e 5 cm de BD_R (Betão betuminoso reciclado) com incorporação de 20% de material fresado aplicada em camada subjacente a desgaste em betão betuminoso drenante. Observou-se assim um aproveitamento da ordem dos 50% de todo o material fresado (22237 toneladas em 44176 toneladas de material disponível). Tal significa que, para aproveitar todo o material fresado na obra em causa, seria necessário duplicar as taxas de reciclagem usadas. Se as taxas de reciclagem fossem de 40% nas misturas MBD_R e 30% nas

misturas BD_R seriam usadas 34111 toneladas, o que representaria um aproveitamento de 77% do material fresado.

Por fim, refira-se que as reduções de custos a que se chegou estão na linha dos valores indicados em alguma bibliografia. Por exemplo, Kandhal e Mallick (1997) indicam as reduções de custos de execução, proporcionados pela reciclagem a quente em central, indicados no Quadro 6.18 e que reflectem a economia devida ao menor consumo de materiais novos. Como se fez referência, às vantagens de ordem económica, também aqui demonstradas e reconhecidas nos meios técnicos, acrescem as vantagens de ordem ambiental que constituem mais um factor favorável à definitiva implementação da técnica em Portugal.

Quadro 6.18 – Redução de custos de execução proporcionados pela reciclagem a quente em central (Kandhal e Mallick, 1997)

TR (%)	Redução de custos (%)
20	14
30	21
40	28
50	34

6.7 Considerações Finais

Ao longo do capítulo foram descritas as principais orientações para a reciclagem a quente em central. Algumas das recomendações a que se fez referência foram publicadas recentemente, como é o caso da especificação E 472 (LNEC, 2006). Ora, face ao previsível aumento das quantidades de material fresado disponível para reciclar, aguarda-se que as orientações existentes em matéria de reciclagem a quente em central, que não apenas as descritas neste trabalho, e doutras técnicas de reciclagem inovadoras, venham a ser transpostas para os cadernos de encargos nacionais, nomeadamente no da entidade rodoviária de referência, a Estradas de Portugal.

Na selecção duma solução de reabilitação, tradicional ou com reciclagem, devem ser ponderados factores de ordem técnica, económica e ambiental. Numa perspectiva económica, e não esquecendo as claras vantagens de ordem ambiental, existindo disponibilidade de equipamento, verificou-se que recorrendo à técnica de reciclagem a quente em central, mesmo com taxas de reciclagem não muito elevadas (30% a 40%), podem conseguir-se reduções de custos de execução significativos.

Por fim, note-se que mesmo para incorporações de material fresado da ordem de 20%, portanto sem grande investimento e sem grandes adaptações nas centrais de fabrico, a redução de custos não deixará de ser aliciante do ponto de vista de quem executa.

6.8 Referências Bibliográficas

- AIPCR (2003). “Pavement Recycling Guidelines for: In-Place Recycling with Cement; In-Place Recycling with Emulsion or foamed bitumen; Hot Mix Recycling in Plant”. Association Mondiale de la Route (ISBN 2-84060-154-0). La Defense - França.
- Antunes, M., Freire, A., Batista, F., Roque, A., Fortunato, E., Martins, I. e Gonçalves, A. (2006). “Utilização de Resíduos de Construção e de Demolição na Construção Rodoviária”. Actas do Seminário “Pavimentos Verdes”, organização conjunta LNEC e CRP, ed. CD, Lisboa.
- Barbosa, T. (2006). “Reabilitação estrutural de um Pavimento com Camada Drenante”. Tese de Mestrado, Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Guimarães.
- Bragança, A. e Pires, A. (2006). “Fabrico e aplicação de Misturas Recicladas a Quente em Central, na Obra de reabilitação da Auto-Estrada A1”. Actas do Seminário “Pavimentos Verdes”, organização conjunta LNEC e CRP, ed. CD, Lisboa.
- Brock, J. D. (2003). “Milling and Recycling”. Technical paper T-127, ASTEC, Chattanooga, USA.
- CEN (2005-a). “Bituminous mixtures – test methods for hot mix asphalt – Part 42: Amount of coarse foreign matter in reclaimed asphalt”. *EN 12697-42*, European Committee for Standardization, Bruxelas
- CEN (2005-b). “Bituminous mixtures – material specifications – Part 8: Reclaimed asphalt”. *EN 13108-8*, European Committee for Standardization, Bruxelas.
- CEN (2004). “Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 39: Binder content by ignition”. *EN 12697-39*, European Committee for Standardization, Bruxelas.
- CEN (2000-a). “Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 1: Soluble binder content”. *EN 12697-1*, European Committee for Standardization, Bruxelas.
- CEN (2000-b). “Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 3: Bitumen recovery: Rotary evaporator”. *EN 12697-3*, European Committee for Standardization, Bruxelas.
- CEN (2000-c). “Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 4: Bitumen recovery: Fractionating column”. *EN 12697-4*, European Committee for Standardization, Bruxelas.
- CEN (2000-d). “Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 14: Water content”. *EN 12697-14*, European Committee for Standardization, Bruxelas.
- CEN (1999-a). “Bitumen and bituminous binders. Determination of needle penetration”. *EN 1426*, European Committee for Standardization, Bruxelas.
- CEN (1999-b). “Bitumen and bituminous binders - Determination of softening point: Ring and Ball method”. *EN 1427*, European Committee for Standardization, Bruxelas.
- Ibarra, J. (2003). “Estudio del Comportamiento de Mezclas Bituminosas Recicladas en Caliente en Planta”. Tese de Doutoramento, Universidade Politécnica da Catalunha, Barcelona.

- IPQ (2002). “Ensaio das propriedades gerais dos agregados. Parte 1: Métodos de amostragem”. *NP EN 932-1*, Instituto Português da Qualidade, Lisboa.
- IPQ (2000). “Ensaio das propriedades geométricas dos agregados. Parte 1: Análise granulométrica. Método de peneiração”. *NP EN 933-1*, Instituto Português da Qualidade, Lisboa.
- IPQ (2004). “Agregados para misturas betuminosas e tratamentos superficiais para estradas, aeroportos e outras áreas de circulação”. *NP EN 13043*, Instituto Português da Qualidade, Lisboa.
- Kandhal, P. e Mallick, R. (1997). “Pavement Recycling Guidelines for State and Local Governments”. Report n.º FHWA-SA-98-042. Federal Highway Administration. Washington-DC.
- LNEC (2006). “Guia para a Reciclagem de Misturas Betuminosas a Quente em Central”. LNEC E 472, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
- Martinho, F. e Picado-Santos, L. (2005). “A Seleção do Processo Construtivo de Reciclagem de Pavimentos Rodoviários”, Actas do XIII Congresso Ibero-latinoamericano del Asfalto (XIII CILA), Ed. CD, San José, Costa Rica.
- Ministerio de Fomento (2001). “Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Conservación de Carreteras (PG-4). Artículo 22 - Reciclado en caliente de capas bituminosas”. Dirección General de carreteras, Orden Circular 8/01, Madrid, Espanha.
- Moreira, J. (2005). “Contribuição para a Reutilização de Material Fresado em Camadas Estruturais de Pavimento”. Tese de Mestrado, Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Guimarães.
- Pereira, P. e Picado-Santos, L. (2006). “Technical-Economical Evaluation of Pavement Recycling Alternatives”. Actas da *Third Gulf Conference on Roads (TGCR06)*. Oman.
- Picado-Santos, L. P. (2005). “Formulação de Misturas Betuminosas a Quente”. Sumário da Lição de Síntese da Agregação. Departamento de Engenharia Civil da F.C.T. da Universidade de Coimbra, Coimbra.

7 CONCLUSÕES GERAIS E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

7.1 Síntese do Trabalho e Conclusões Gerais

Com o desenvolvimento do presente trabalho pretendia-se contribuir para a implementação em Portugal da técnica de reciclagem a quente em central, a qual constitui uma das alternativas a considerar no projecto de reabilitação estrutural de pavimentos rodoviários flexíveis. Ao longo da dissertação foram tratados, sequencialmente, os principais temas relacionados com o estudo das misturas recicladas a quente em central (MBRQ), tendo-se, no entanto, direccionado o trabalho experimental para a avaliação das características mecânicas das misturas.

Primeiro, no Capítulo 2 fez-se uma descrição das principais alternativas de reciclagem de misturas betuminosas, tendo-se dado particular atenção à técnica de reciclagem em central e às respectivas variantes de fabrico. Por um lado, verificou-se que no designado método a frio, devido à limitação relativa ao aquecimento dos agregados, não se podem adoptar taxas de reciclagem elevadas sem comprometer a temperatura final da mistura. Por outro lado, sendo o material fresado aquecido conseguem-se taxas de reciclagem mais altas e que podem atingir 70%, existindo mesmo experiências noutros países com taxas de reciclagem mais elevadas e que tiveram sucesso.

No que respeita ao fabrico, no Capítulo 2 estudou-se ainda o equilíbrio térmico no processo de mistura e propuseram-se e validaram-se expressões (2.29 e 2.30, página 33) que permitem estimar a temperatura de aquecimento dos agregados em função da temperatura e humidade do material fresado, da composição da mistura, da temperatura final pretendida e das perdas de calor da central.

De seguida, tendo em vista o estudo dos métodos de formulação das MBRQ, no Capítulo 3 fez-se uma descrição das características gerais dos materiais elementares e das misturas, das propriedades mecânicas fundamentais das misturas (características de deformabilidade e comportamento à fadiga e à deformação permanente) e dos ensaios que permitem avaliar o seu desempenho mecânico.

Verificou-se que os métodos de formulação de misturas a quente, a que se fez referência, são geralmente adaptáveis à formulação das MBRQ. Depois duma exposição mais detalhada dos

métodos de formulação das MBRQ, apresentou-se o método de formulação tomado como referência nos trabalhos experimentais, tendo sido dado um exemplo de aplicação.

No Capítulo 4 fez-se uma síntese dos trabalhos experimentais realizados. Estudaram-se três tipos de MBRQ: misturas de macadame betuminoso (MBTE) que foram aplicadas em trechos experimentais; misturas idênticas produzidas e compactadas em laboratório (MBLB); e ainda misturas de betão betuminoso apenas produzidas e compactadas em laboratório (BDLB). Os ensaios de caracterização mecânica das misturas estudadas permitiram fazer uma caracterização completa das designadas propriedades fundamentais das misturas.

Os resultados desses ensaios apresentaram-se e analisaram-se no Capítulo 5. Em síntese, as considerações finais, expostas no final do capítulo de análise resultados, permitiram concluir que, regra geral, as características de deformabilidade e de resistência à fadiga e à deformação permanente das misturas recicladas a quente é idêntico ou melhor que o das misturas tradicionais.

Por fim, no Capítulo 6 fez-se um apanhado das principais recomendações para a reciclagem a quente em central. As vantagens apontadas à técnica, conjugadas com o bom desempenho mecânico das misturas recicladas a quente (MBRQ), constituem os pontos fortes que a elegem como uma das técnicas com maior potencial de crescimento em Portugal nos próximos anos.

7.2 Desenvolvimentos Futuros

Um trabalho de investigação nunca é um trabalho acabado. Na área dos pavimentos rodoviários, as tecnologias de fabrico e aplicação das MBRQ, os métodos de formulação e os modelos de previsão do seu comportamento mecânico, entre outras áreas de investigação, irão certamente desenvolver-se no futuro. Esperam-se igualmente desenvolvimento em termos de legislação e a definição de critérios de conformidade adaptados às MBRQ.

No que respeita à formulação das misturas betuminosas, actualmente o Laboratório de Mecânica de Pavimentos do DEC-FCTUC já tem uma prensa de corte giratória (PCG), que constitui uma alternativa ao método de *Marshall*. Aliás, o Laboratório dispõe dos equipamentos de caracterização dos materiais e de realização de ensaios de desempenho usados e que se referiram ao longo da dissertação. Nesta área, espera-se vir a dispor, num futuro próximo, dum simulador de tráfego à escala real.

Com este último equipamento, porque reproduz de forma mais aproximada o estado de tensão nas diferentes camadas do pavimento, poderá ficar a conhecer-se ainda melhor o comportamento das misturas betuminosas (recicladas ou não) e de outros materiais de

pavimentação. Será assim possível fazer uma observação sistemática de camadas de pavimentos realizados em pistas construídas expressamente para esse fim.

Neste contexto, será possível aprofundar o estudo das MBRQC, considerando outros tipos de misturas, outras formas de fabrico e aplicação das misturas em trechos experimentais (em que o material fresado seja aquecido) e outras condições de ensaio. Será assim possível comparar, de forma mais ampla, o comportamento destas misturas com o das misturas tradicionais.

É ainda desejável que a reciclagem a quente em central constitua uma efectiva alternativa tecnológica para a reabilitação de pavimentos rodoviários flexíveis em Portugal. Para tal será necessário dar continuidade às investigações realizadas neste âmbito de modo a contribuir para a normalização de procedimentos adaptados à tecnologia portuguesa.

7.3 Considerações Finais

Finalmente, entende-se que foram alcançados os objectivos definidos inicialmente. Além da revisão apresentada sobre as técnicas de reciclagem e da formulação das MBRQ, a caracterização mecânica das misturas estudadas permitiu evidenciar as vantagens da técnica ao nível técnico, económico e ambiental. Ao longo da dissertação foram apresentados ainda outros contributos mais específicos, como por exemplo os relativos ao equilíbrio térmico, à metodologia de formulação, ao método de interpretação dos resultados dos ensaios de fadiga, à avaliação global do desempenho mecânico e a algumas orientações para a produção e controlo de qualidade.

Em síntese, julga-se que o trabalho desenvolvido, consubstanciado na presente dissertação, poderá contribuir para a efectiva implementação em Portugal da técnica de reciclagem a quente em central. Assim, com a crescente consciencialização relativamente a questões ambientais e com legislação cada vez mais exigente deste ponto de vista, espera-se que as técnicas de reciclagem de misturas betuminosas – incluindo a reciclagem a quente em central – sejam de uso corrente e obrigatório num futuro próximo.

ANEXO I – RESULTADOS DOS ENSAIOS SOBRE PROVETES DE MACADAME BETUMINOSO DOS TRECHOS EXPERIMENTAIS

I.1 Designação das Misturas

Neste anexo apresentam-se os resultados experimentais dos ensaios realizados sobre provetes das doze misturas de macadame betuminoso aplicadas nos trechos experimentais (Quadro I.1).

Quadro I.1 – Misturas de macadame betuminoso aplicadas nos trechos experimentais

Número da Mistura	Designação da Mistura	Tipo de Mistura	TR (%)	Betume Novo	Previsto		Observado	
					pb _R (%)	pb _N (%)	pb _R (%)	pb _N (%)
01	A1	MB	0	35/50	3,7	3,7	3,6	3,6
02	A2	MB	0	35/50	4,2	4,2	4,1	4,1
03	A3	MB	0	35/50	4,7	4,7	4,6	4,6
04	B1	MB _R	20	35/50	3,8	3,0	3,8	3,0
05	B2	MB _R	20	35/50	4,3	3,5	4,4	3,6
06	B3	MB _R	20	35/50	4,8	4,0	4,7	3,9
07	C1	MB _R	30	35/50	3,9	2,7	4,1	2,9
08	C2	MB _R	30	35/50	4,4	3,2	4,6	3,4
09	C3	MB _R	30	35/50	4,9	3,7	5,0	3,8
10	D1	MB _R	40	35/50	4,2	2,6	4,3	2,7
11	D2	MB _R	40	35/50	4,7	3,1	4,7	3,1
12	D3	MB _R	40	35/50	5,2	3,6	5,1	3,5

I.2 Características Gerais das Misturas

Antes dos resultados dos ensaios de desempenho, apresentam-se as características gerais dos provetes ensaiados. Nos Quadros I.2 a I.13 indicam-se as propriedades de todas as vigas de $8 \times 8 \times 40 \text{ cm}^3$ produzidas para os ensaios de flexão.

Nos Quadros I.14 a I.25 podem observar-se as características dos provetes cilíndricos de 150 mm de diâmetro, disponíveis para os ensaios de compressão (uniaxiais cíclicos e triaxiais cíclicos). Finalmente, do Quadro I.26 ao Quadro I.29, indicam-se as características das lajes usadas nos ensaios com simulador de tráfego.

Quadro I.2 – Características gerais das vigas de macadame betuminoso, provenientes dos trechos experimentais (Mistura A1)

PROVETE	Bm (g/cm ³)	Bt (g/cm ³)	n (%)	TVB (%)	VMA (%)	Sb (%)
A1-V01	2,342	2,504	6,5	8,2	14,7	55,9
A1-V02	2,339	2,504	6,6	8,2	14,8	55,4
A1-V03	2,338	2,504	6,6	8,2	14,8	55,2
A1-V04	2,338	2,504	6,6	8,2	14,8	55,2
A1-V05	2,340	2,504	6,5	8,2	14,7	55,5
A1-V06	2,377	2,504	5,1	8,3	13,4	62,1
A1-V07	2,381	2,504	4,9	8,3	13,2	62,9
A1-V08	2,366	2,504	5,5	8,3	13,8	60,0
A1-V09	2,379	2,504	5,0	8,3	13,3	62,5
A1-V10	2,350	2,504	6,2	8,2	14,4	57,2
A1-V11	2,344	2,504	6,4	8,2	14,6	56,2
A1-V12	2,372	2,504	5,3	8,3	13,6	61,1
A1-Vmed	2,356	2,504	5,9	8,2	14,2	58,3

Quadro I.3 – Características gerais das vigas de macadame betuminoso, provenientes dos trechos experimentais (Mistura A2)

PROVETE	Bm (g/cm ³)	Bt (g/cm ³)	n (%)	TVB (%)	VMA (%)	Sb (%)
A2-V01	2,356	2,497	5,6	9,4	15,0	62,4
A2-V02	2,332	2,497	6,6	9,3	15,9	58,4
A2-V03	2,408	2,497	3,6	9,6	13,1	72,9
A2-V04	2,413	2,497	3,4	9,6	13,0	74,1
A2-V05	2,349	2,497	5,9	9,4	15,3	61,2
A2-V06	2,381	2,497	4,6	9,5	14,1	67,1
A2-V07	2,348	2,497	6,0	9,3	15,3	61,0
A2-V08	2,369	2,497	5,1	9,4	14,6	64,8
A2-V09	2,397	2,497	4,0	9,5	13,5	70,4
A2-V10	2,424	2,497	2,9	9,6	12,6	76,7
A2-V11	2,420	2,497	3,1	9,6	12,7	75,8
A2-V12	2,420	2,497	3,1	9,6	12,7	75,8
A2-Vmed	2,385	2,497	4,5	9,5	14,0	68,4

Quadro I.4 – Características gerais das vigas de macadame betuminoso, provenientes dos trechos experimentais (Mistura A3)

PROVETE	Bm (g/cm ³)	Bt (g/cm ³)	n (%)	TVB (%)	VMA (%)	Sb (%)
A3-V01	2,391	2,493	4,1	10,7	14,8	72,3
A3-V02	2,390	2,493	4,1	10,7	14,8	72,1
A3-V03	2,377	2,493	4,7	10,6	15,3	69,5
A3-V04	2,384	2,493	4,4	10,6	15,0	70,9
A3-V05	2,375	2,493	4,7	10,6	15,3	69,1
A3-V06	2,388	2,493	4,2	10,7	14,9	71,7
A3-V07	2,404	2,493	3,6	10,7	14,3	75,0
A3-V08	2,377	2,493	4,7	10,6	15,3	69,5
A3-V09	2,375	2,493	4,7	10,6	15,3	69,1
A3-V10	2,397	2,493	3,9	10,7	14,6	73,5
A3-V11	2,392	2,493	4,1	10,7	14,7	72,5
A3-V12	2,411	2,493	3,3	10,8	14,1	76,6
A3-Vmed	2,388	2,493	4,2	10,7	14,9	71,8

Quadro I.5 – Características gerais das vigas de macadame betuminoso, provenientes dos trechos experimentais (Mistura B1)

PROVETE	Bm (g/cm ³)	Bt (g/cm ³)	n (%)	TVB (%)	VMA (%)	Sb (%)
B1-V01	2,384	2,516	5,2	8,8	14,0	62,6
B1-V02	2,401	2,516	4,6	8,9	13,4	66,0
B1-V03	2,380	2,516	5,4	8,8	14,2	61,9
B1-V04	2,399	2,516	4,7	8,9	13,5	65,6
B1-V05	2,394	2,516	4,8	8,8	13,7	64,6
B1-V06	2,380	2,516	5,4	8,8	14,2	61,9
B1-V07	2,403	2,516	4,5	8,9	13,4	66,4
B1-V08	2,379	2,516	5,4	8,8	14,2	61,7
B1-V09	2,383	2,516	5,3	8,8	14,1	62,5
B1-V10	2,387	2,516	5,1	8,8	13,9	63,2
B1-V11	2,395	2,516	4,8	8,8	13,6	64,8
B1-V12	2,381	2,516	5,4	8,8	14,1	62,1
B1-Vmed	2,389	2,516	5,1	8,8	13,9	63,6

Quadro I.6 – Características gerais das vigas de macadame betuminoso, provenientes dos trechos experimentais (Mistura B2)

PROVETE	Bm (g/cm ³)	Bt (g/cm ³)	n (%)	TVB (%)	VMA (%)	Sb (%)
B2-V01	2,406	2,494	3,5	10,3	13,8	74,4
B2-V02	2,398	2,494	3,8	10,2	14,1	72,7
B2-V03	2,399	2,494	3,8	10,2	14,1	72,9
B2-V04	2,394	2,494	4,0	10,2	14,2	71,8
B2-V05	2,408	2,494	3,4	10,3	13,7	74,9
B2-V06	2,410	2,494	3,4	10,3	13,7	75,3
B2-V07	2,414	2,494	3,2	10,3	13,5	76,3
B2-V08	2,414	2,494	3,2	10,3	13,5	76,3
B2-V09	2,416	2,494	3,1	10,3	13,4	76,7
B2-V10	2,409	2,494	3,4	10,3	13,7	75,1
B2-V11	2,406	2,494	3,5	10,3	13,8	74,4
B2-V12	2,400	2,494	3,8	10,3	14,0	73,1
B2-Vmed	2,406	2,494	3,5	10,3	13,8	74,5

Quadro I.7 – Características gerais das vigas de macadame betuminoso, provenientes dos trechos experimentais (Mistura B3)

PROVETE	Bm (g/cm ³)	Bt (g/cm ³)	n (%)	TVB (%)	VMA (%)	Sb (%)
B3-V01	2,429	2,475	1,9	11,1	12,9	85,6
B3-V02	2,414	2,475	2,5	11,0	13,5	81,7
B3-V03	2,417	2,475	2,3	11,0	13,4	82,5
B3-V04	2,420	2,475	2,2	11,0	13,3	83,2
B3-V05	2,406	2,475	2,8	11,0	13,8	79,7
B3-V06	2,420	2,475	2,2	11,0	13,3	83,2
B3-V07	2,425	2,475	2,0	11,1	13,1	84,6
B3-V08	2,412	2,475	2,5	11,0	13,6	81,2
B3-V09	2,415	2,475	2,4	11,0	13,4	82,0
B3-V10	2,424	2,475	2,1	11,1	13,1	84,3
B3-V11	2,422	2,475	2,1	11,1	13,2	83,8
B3-V12	2,434	2,475	1,7	11,1	12,8	87,0
B3-Vmed	2,420	2,475	2,2	11,0	13,3	83,2

Quadro I.8 – Características gerais das vigas de macadame betuminoso, provenientes dos trechos experimentais (Mistura C1)

PROVETE	Bm (g/cm ³)	Bt (g/cm ³)	n (%)	TVB (%)	VMA (%)	Sb (%)
C1-V01	2,330	2,506	7,0	9,3	16,3	56,9
C1-V02	2,383	2,506	4,9	9,5	14,4	65,9
C1-V03	2,412	2,506	3,8	9,6	13,4	71,9
C1-V04	2,396	2,506	4,4	9,5	13,9	68,5
C1-V05	2,412	2,506	3,8	9,6	13,4	71,9
C1-V06	2,395	2,506	4,4	9,5	14,0	68,3
C1-V07	2,399	2,506	4,3	9,5	13,8	69,1
C1-V08	2,377	2,506	5,1	9,5	14,6	64,8
C1-V09	2,405	2,506	4,0	9,6	13,6	70,4
C1-V10	2,379	2,506	5,1	9,5	14,5	65,1
C1-V11	2,373	2,506	5,3	9,4	14,8	64,0
C1-V12	2,363	2,506	5,7	9,4	15,1	62,2
C1-Vmed	2,385	2,506	4,8	9,5	14,3	66,6

Quadro I.9 – Características gerais das vigas de macadame betuminoso, provenientes dos trechos experimentais (Mistura C2)

PROVETE	Bm (g/cm ³)	Bt (g/cm ³)	n (%)	TVB (%)	VMA (%)	Sb (%)
C2-V01	2,373	2,495	4,9	10,6	15,5	68,4
C2-V02	2,399	2,495	3,8	10,7	14,6	73,6
C2-V03	2,353	2,495	5,7	10,5	16,2	64,9
C2-V04	2,351	2,495	5,8	10,5	16,3	64,5
C2-V05	2,345	2,495	6,0	10,5	16,5	63,5
C2-V06	2,346	2,495	6,0	10,5	16,4	63,7
C2-V07	2,356	2,495	5,6	10,5	16,1	65,4
C2-V08	2,379	2,495	4,6	10,6	15,3	69,6
C2-V09	2,371	2,495	5,0	10,6	15,6	68,1
C2-V10	2,363	2,495	5,3	10,6	15,8	66,6
C2-V11	2,377	2,495	4,7	10,6	15,3	69,2
C2-V12	2,423	2,495	2,9	10,8	13,7	78,9
C2-Vmed	2,370	2,495	5,0	10,6	15,6	68,0

Quadro I.10 – Características gerais das vigas de macadame betuminoso, provenientes dos trechos experimentais (Mistura C3)

PROVETE	Bm (g/cm ³)	Bt (g/cm ³)	n (%)	TVB (%)	VMA (%)	Sb (%)
C3-V01	2,461	2,486	1,0	11,9	13,0	92,2
C3-V02	2,459	2,486	1,1	11,9	13,0	91,7
C3-V03	2,462	2,486	1,0	12,0	12,9	92,5
C3-V04	2,460	2,486	1,0	11,9	13,0	91,9
C3-V05	2,457	2,486	1,2	11,9	13,1	91,1
C3-V06	2,457	2,486	1,2	11,9	13,1	91,1
C3-V07	2,459	2,486	1,1	11,9	13,0	91,7
C3-V08	2,461	2,486	1,0	11,9	13,0	92,2
C3-V09	2,461	2,486	1,0	11,9	13,0	92,2
C3-V10	2,455	2,486	1,2	11,9	13,2	90,5
C3-V11	2,454	2,486	1,3	11,9	13,2	90,2
C3-V12	2,455	2,486	1,2	11,9	13,2	90,5
C3-Vmed	2,458	2,486	1,1	11,9	13,0	91,5

Quadro I.11 – Características gerais das vigas de macadame betuminoso, provenientes dos trechos experimentais (Mistura D1)

PROVETE	Bm (g/cm ³)	Bt (g/cm ³)	n (%)	TVB (%)	VMA (%)	Sb (%)
D1-V01	2,451	2,490	1,6	10,2	11,8	86,7
D1-V02	2,451	2,490	1,6	10,2	11,8	86,7
D1-V03	2,457	2,490	1,3	10,3	11,6	88,6
D1-V04	2,450	2,490	1,6	10,2	11,8	86,4
D1-V05	2,451	2,490	1,6	10,2	11,8	86,7
D1-V06	2,429	2,490	2,4	10,1	12,6	80,5
D1-V07	2,425	2,490	2,6	10,1	12,7	79,5
D1-V08	2,422	2,490	2,7	10,1	12,8	78,7
D1-V09	2,434	2,490	2,2	10,2	12,4	81,9
D1-V10	2,402	2,490	3,5	10,0	13,6	73,9
D1-V11	2,451	2,490	1,6	10,2	11,8	86,7
D1-V12	2,444	2,490	1,8	10,2	12,1	84,7
D1-Vmed	2,439	2,490	2,1	10,2	12,2	83,4

Quadro I.12 – Características gerais das vigas de macadame betuminoso, provenientes dos trechos experimentais (Mistura D2)

PROVETE	Bm (g/cm ³)	Bt (g/cm ³)	n (%)	TVB (%)	VMA (%)	Sb (%)
D2-V01	2,397	2,478	3,3	10,9	14,2	77,0
D2-V02	2,390	2,478	3,6	10,9	14,5	75,4
D2-V03	2,374	2,478	4,2	10,8	15,0	72,1
D2-V04	2,364	2,478	4,6	10,8	15,4	70,1
D2-V05	2,384	2,478	3,8	10,9	14,7	74,1
D2-V06	2,369	2,478	4,4	10,8	15,2	71,1
D2-V07	2,435	2,478	1,7	11,1	12,8	86,5
D2-V08	2,423	2,478	2,2	11,1	13,3	83,3
D2-V09	2,434	2,478	1,8	11,1	12,9	86,2
D2-V10	2,413	2,478	2,6	11,0	13,6	80,8
D2-V11	2,384	2,478	3,8	10,9	14,7	74,1
D2-V12	2,419	2,478	2,4	11,0	13,4	82,3
D2-Vmed	2,399	2,478	3,2	10,9	14,1	77,7

Quadro I.13 – Características gerais das vigas de macadame betuminoso, provenientes dos trechos experimentais (Mistura D3)

PROVETE	Bm (g/cm ³)	Bt (g/cm ³)	n (%)	TVB (%)	VMA (%)	Sb (%)
D3-V01	2,452	2,467	0,6	12,1	12,7	95,2
D3-V02	2,454	2,467	0,5	12,2	12,7	95,8
D3-V03	2,458	2,467	0,4	12,2	12,5	97,1
D3-V04	2,453	2,467	0,6	12,1	12,7	95,5
D3-V05	2,456	2,467	0,4	12,2	12,6	96,5
D3-V06	2,452	2,467	0,6	12,1	12,7	95,2
D3-V07	2,453	2,467	0,6	12,1	12,7	95,5
D3-V08	2,458	2,467	0,4	12,2	12,5	97,1
D3-V09	2,454	2,467	0,5	12,2	12,7	95,8
D3-V10	2,454	2,467	0,5	12,2	12,7	95,8
D3-V11	2,450	2,467	0,7	12,1	12,8	94,6
D3-V12	2,454	2,467	0,5	12,2	12,7	95,8
D3-Vmed	2,454	2,467	0,5	12,2	12,7	95,8

Quadro I.14 – Características gerais dos provetes cilíndricos de macadame betuminoso, provenientes dos trechos experimentais (Mistura A1)

PROVETE	Bm (g/cm ³)	Bt (g/cm ³)	n (%)	TVB (%)	VMA (%)	Sb (%)
A1-C01	2,389	2,504	4,6	8,3	12,9	64,3
A1-C02	2,362	2,504	5,7	8,2	13,8	59,0
A1-C03	2,353	2,504	6,0	8,1	14,2	57,5
A1-C04	2,395	2,504	4,4	8,3	12,6	65,6
A1-C05	2,367	2,504	5,5	8,2	13,7	60,0
A1-C06	2,397	2,504	4,3	8,3	12,6	66,0
A1-C07	2,358	2,504	5,8	8,2	14,0	58,3
A1-C08	2,402	2,504	4,1	8,3	12,4	67,1
A1-C09	2,362	2,504	5,7	8,2	13,8	59,0
A1-C10	2,396	2,504	4,3	8,3	12,6	65,8
A1-Cmed	2,378	2,504	5,0	8,2	13,3	62,3

Quadro I.15 – Características gerais dos provetes cilíndricos de macadame betuminoso, provenientes dos trechos experimentais (Mistura A2)

PROVETE	Bm (g/cm ³)	Bt (g/cm ³)	n (%)	TVB (%)	VMA (%)	Sb (%)
A2-C01	2,395	2,497	4,1	9,4	13,5	69,8
A2-C02	2,420	2,497	3,1	9,5	12,6	75,6
A2-C03	2,376	2,497	4,8	9,4	14,2	65,9
A2-C04	2,367	2,497	5,2	9,3	14,5	64,2
A2-C05	2,368	2,497	5,2	9,3	14,5	64,4
A2-C06	2,368	2,497	5,2	9,3	14,5	64,4
A2-C07	2,381	2,497	4,6	9,4	14,0	66,9
A2-C08	2,399	2,497	3,9	9,5	13,4	70,7
A2-C09	2,370	2,497	5,1	9,3	14,4	64,8
A2-C10	2,355	2,497	5,7	9,3	15,0	62,0
A2-C11	2,359	2,497	5,5	9,3	14,8	62,7
A2-C12	2,424	2,497	2,9	9,6	12,5	76,6
A2-Cmed	2,382	2,497	4,6	9,4	14,0	67,3

Quadro I.16 – Características gerais dos provetes cilíndricos de macadame betuminoso, provenientes dos trechos experimentais (Mistura A3)

PROVETE	Bm (g/cm ³)	Bt (g/cm ³)	n (%)	TVB (%)	VMA (%)	Sb (%)
A3-C01	2,390	2,493	4,1	10,6	14,7	71,9
A3-C02	2,426	2,493	2,7	10,7	13,4	80,0
A3-C03	2,428	2,493	2,6	10,7	13,3	80,5
A3-C04	2,419	2,493	3,0	10,7	13,7	78,3
A3-C05	2,402	2,493	3,7	10,6	14,3	74,4
A3-C06	2,388	2,493	4,2	10,6	14,8	71,5
A3-C07	2,377	2,493	4,7	10,5	15,2	69,3
A3-C08	2,388	2,493	4,2	10,6	14,8	71,5
A3-C09	2,406	2,493	3,5	10,6	14,1	75,3
A3-C10	2,401	2,493	3,7	10,6	14,3	74,2
A3-Cmed	2,403	2,493	3,6	10,6	14,3	74,7

Quadro I.17 – Características gerais dos provetes cilíndricos de macadame betuminoso, provenientes dos trechos experimentais (Mistura B1)

PROVETE	Bm (g/cm ³)	Bt (g/cm ³)	n (%)	TVB (%)	VMA (%)	Sb (%)
B1-C01	2,365	2,516	6,0	8,6	14,6	59,0
B1-C02	2,361	2,516	6,2	8,6	14,8	58,3
B1-C03	2,384	2,516	5,2	8,7	14,0	62,4
B1-C04	2,388	2,516	5,1	8,7	13,8	63,2
B1-C05	2,390	2,516	5,0	8,7	13,7	63,6
B1-C06	2,385	2,516	5,2	8,7	13,9	62,6
B1-C07	2,385	2,516	5,2	8,7	13,9	62,6
B1-C08	2,371	2,516	5,8	8,7	14,4	60,1
B1-C09	2,388	2,516	5,1	8,7	13,8	63,2
B1-C10	2,380	2,516	5,4	8,7	14,1	61,7
B1-Cmed	2,380	2,516	5,4	8,7	14,1	61,7

Quadro I.18 – Características gerais dos provetes cilíndricos de macadame betuminoso, provenientes dos trechos experimentais (Mistura B2)

PROVETE	Bm (g/cm ³)	Bt (g/cm ³)	n (%)	TVB (%)	VMA (%)	Sb (%)
B2-C01	2,420	2,494	3,0	10,2	13,2	77,5
B2-C02	2,401	2,494	3,7	10,2	13,9	73,1
B2-C03	2,411	2,494	3,3	10,2	13,5	75,4
B2-C04	2,387	2,494	4,3	10,1	14,4	70,2
B2-C05	2,409	2,494	3,4	10,2	13,6	74,9
B2-C06	2,421	2,494	2,9	10,2	13,2	77,8
B2-C07	2,416	2,494	3,1	10,2	13,3	76,6
B2-C08	2,406	2,494	3,5	10,2	13,7	74,3
B2-C09	2,404	2,494	3,6	10,2	13,8	73,8
B2-C10	2,402	2,494	3,7	10,2	13,9	73,4
B2-Cmed	2,408	2,494	3,5	10,2	13,6	74,7

Quadro I.19 – Características gerais dos provetes cilíndricos de macadame betuminoso, provenientes dos trechos experimentais (Mistura B3)

PROVETE	Bm (g/cm ³)	Bt (g/cm ³)	n (%)	TVB (%)	VMA (%)	Sb (%)
B3-C01	2,440	2,475	1,4	11,0	12,4	88,6
B3-C02	2,425	2,475	2,0	11,0	13,0	84,4
B3-C03	2,437	2,475	1,5	11,0	12,5	87,8
B3-C04	2,443	2,475	1,3	11,0	12,3	89,5
B3-C05	2,435	2,475	1,6	11,0	12,6	87,2
B3-C06	2,432	2,475	1,7	11,0	12,7	86,4
B3-C07	2,425	2,475	2,0	11,0	13,0	84,4
B3-C08	2,427	2,475	1,9	11,0	12,9	85,0
B3-C09	2,444	2,475	1,3	11,0	12,3	89,8
B3-C10	2,444	2,475	1,3	11,0	12,3	89,8
B3-Cmed	2,435	2,475	1,6	11,0	12,6	87,3

Quadro I.20 – Características gerais dos provetes cilíndricos de macadame betuminoso, provenientes dos trechos experimentais (Mistura C1)

PROVETE	Bm (g/cm ³)	Bt (g/cm ³)	n (%)	TVB (%)	VMA (%)	Sb (%)
C1-C01	2,408	2,506	3,9	9,5	13,4	70,8
C1-C02	2,354	2,506	6,1	9,3	15,3	60,5
C1-C03	2,338	2,506	6,7	9,2	15,9	57,9
C1-C04	2,367	2,506	5,5	9,3	14,9	62,7
C1-C05	2,349	2,506	6,3	9,3	15,5	59,6
C1-C06	2,326	2,506	7,2	9,2	16,4	56,1
C1-C07	2,356	2,506	6,0	9,3	15,3	60,8
C1-C08	2,353	2,506	6,1	9,3	15,4	60,3
C1-C09	2,340	2,506	6,6	9,2	15,8	58,2
C1-C10	2,401	2,506	4,2	9,5	13,7	69,3
C1-Cmed	2,359	2,506	5,9	9,3	15,2	61,6

Quadro I.21 – Características gerais dos provetes cilíndricos de macadame betuminoso, provenientes dos trechos experimentais (Mistura C2)

PROVETE	Bm (g/cm ³)	Bt (g/cm ³)	n (%)	TVB (%)	VMA (%)	Sb (%)
C2-C01	2,385	2,495	4,4	10,5	15,0	70,5
C2-C02	2,394	2,495	4,0	10,6	14,6	72,3
C2-C03	2,345	2,495	6,0	10,4	16,4	63,3
C2-C04	2,383	2,495	4,5	10,5	15,0	70,1
C2-C05	2,387	2,495	4,3	10,6	14,9	70,9
C2-C06	2,354	2,495	5,7	10,4	16,1	64,8
C2-C07	2,394	2,495	4,0	10,6	14,6	72,3
C2-C08	2,349	2,495	5,9	10,4	16,2	64,0
C2-C09	2,349	2,495	5,9	10,4	16,2	64,0
C2-C10	2,350	2,495	5,8	10,4	16,2	64,1
C2-Cmed	2,369	2,495	5,1	10,5	15,5	67,6

Quadro I.22 – Características gerais dos provetes cilíndricos de macadame betuminoso, provenientes dos trechos experimentais (Mistura C3)

PROVETE	Bm (g/cm ³)	Bt (g/cm ³)	n (%)	TVB (%)	VMA (%)	Sb (%)
C3-C01	2,444	2,486	1,7	11,8	13,4	87,4
C3-C02	2,459	2,486	1,1	11,8	12,9	91,6
C3-C03	2,454	2,486	1,3	11,8	13,1	90,2
C3-C04	2,452	2,486	1,4	11,8	13,2	89,6
C3-C05	2,457	2,486	1,2	11,8	13,0	91,0
C3-C06	2,455	2,486	1,2	11,8	13,0	90,4
C3-C07	2,440	2,486	1,9	11,7	13,6	86,4
C3-C08	2,457	2,486	1,2	11,8	13,0	91,0
C3-C09	2,453	2,486	1,3	11,8	13,1	89,9
C3-C10	2,441	2,486	1,8	11,7	13,5	86,6
C3-Cmed	2,451	2,486	1,4	11,8	13,2	89,4

Quadro I.23 – Características gerais dos provetes cilíndricos de macadame betuminoso, provenientes dos trechos experimentais (Mistura D1)

PROVETE	Bm (g/cm ³)	Bt (g/cm ³)	n (%)	TVB (%)	VMA (%)	Sb (%)
D1-C01	2,451	2,490	1,6	10,1	11,7	86,6
D1-C02	2,457	2,490	1,3	10,2	11,5	88,5
D1-C03	2,456	2,490	1,4	10,2	11,5	88,1
D1-C04	2,437	2,490	2,1	10,1	12,2	82,6
D1-C05	2,418	2,490	2,9	10,0	12,9	77,6
D1-C06	2,445	2,490	1,8	10,1	11,9	84,8
D1-C07	2,447	2,490	1,7	10,1	11,8	85,4
D1-C08	2,430	2,490	2,4	10,0	12,5	80,7
D1-C09	2,444	2,490	1,8	10,1	12,0	84,5
D1-C10	2,431	2,490	2,4	10,1	12,4	80,9
D1-Cmed	2,442	2,490	1,9	10,1	12,0	84,0

Quadro I.24 – Características gerais dos provetes cilíndricos de macadame betuminoso, provenientes dos trechos experimentais (Mistura D2)

PROVETE	Bm (g/cm ³)	Bt (g/cm ³)	n (%)	TVB (%)	VMA (%)	Sb (%)
D2-C01	2,399	2,478	3,2	10,8	14,0	77,3
D2-C02	2,381	2,478	3,9	10,8	14,7	73,3
D2-C03	2,432	2,478	1,9	11,0	12,8	85,6
D2-C04	2,383	2,478	3,8	10,8	14,6	73,7
D2-C05	2,389	2,478	3,6	10,8	14,4	75,0
D2-C06	2,428	2,478	2,0	11,0	13,0	84,5
D2-C07	2,421	2,478	2,3	10,9	13,2	82,6
D2-C08	2,442	2,478	1,5	11,0	12,5	88,4
D2-C09	2,431	2,478	1,9	11,0	12,9	85,3
D2-C10	2,391	2,478	3,5	10,8	14,3	75,5
D2-Cmed	2,410	2,478	2,8	10,9	13,6	80,1

Quadro I.25 – Características gerais dos provetes cilíndricos de macadame betuminoso, provenientes dos trechos experimentais (Mistura D3)

PROVETE	Bm (g/cm ³)	Bt (g/cm ³)	n (%)	TVB (%)	VMA (%)	Sb (%)
D3-C01	2,439	2,467	1,1	12,0	13,1	91,3
D3-C02	2,436	2,467	1,3	11,9	13,2	90,5
D3-C03	2,442	2,467	1,0	12,0	13,0	92,2
D3-C04	2,447	2,467	0,8	12,0	12,8	93,7
D3-C05	2,443	2,467	1,0	12,0	13,0	92,5
D3-C06	2,436	2,467	1,3	11,9	13,2	90,5
D3-C07	2,446	2,467	0,9	12,0	12,8	93,4
D3-C08	2,439	2,467	1,1	12,0	13,1	91,3
D3-C09	2,443	2,467	1,0	12,0	13,0	92,5
D3-C10	2,447	2,467	0,8	12,0	12,8	93,7
D3-Cmed	2,442	2,467	1,0	12,0	13,0	92,2

Quadro I.26 – Características gerais das lajes de macadame betuminoso, provenientes dos trechos experimentais, usadas nos ensaios com simulador de tráfego (Misturas A1, A2 e A3)

PROVETE	Bm (g/cm ³)	Bt (g/cm ³)	n (%)	TVB (%)	VMA (%)	Sb (%)
A1-L01	2,348	2,504	6,2	8,1	14,4	56,6
A1-L02	2,339	2,504	6,6	8,1	14,7	55,1
A1-L03	2,364	2,504	5,6	8,2	13,8	59,4
A1-Lmed	2,350	2,504	6,1	8,1	14,3	57,0
A2-L01	2,364	2,497	5,3	9,3	14,6	63,6
A2-L02	2,398	2,497	4,0	9,5	13,4	70,5
A2-L03	2,402	2,497	3,8	9,5	13,3	71,3
A2-Lmed	2,388	2,497	4,4	9,4	13,8	68,5
A3-L01	2,390	2,493	4,1	10,6	14,7	71,9
A3-L02	2,396	2,493	3,9	10,6	14,5	73,1
A3-L03	2,399	2,493	3,8	10,6	14,4	73,8
A3-Lmed	2,395	2,493	3,9	10,6	14,5	72,9

Quadro I.27 – Características gerais das lajes de macadame betuminoso, provenientes dos trechos experimentais, usadas nos ensaios com simulador de tráfego (Misturas B1, B2 e B3)

PROVETE	Bm (g/cm ³)	Bt (g/cm ³)	n (%)	TVB (%)	VMA (%)	Sb (%)
B1-L01	2,403	2,516	4,5	8,8	13,3	66,2
B1-L02	2,382	2,516	5,3	8,7	14,0	62,0
B1-L03	2,384	2,516	5,2	8,7	14,0	62,4
B1-Lmed	2,390	2,516	5,0	8,7	13,8	63,5
B2-L01	2,392	2,494	4,1	10,1	14,2	71,2
B2-L02	2,406	2,494	3,5	10,2	13,7	74,3
B2-L03	2,392	2,494	4,1	10,1	14,2	71,2
B2-Lmed	2,397	2,494	3,9	10,1	14,0	72,2
B3-L01	2,424	2,475	2,1	11,0	13,0	84,2
B3-L02	2,422	2,475	2,1	10,9	13,1	83,6
B3-L03	2,421	2,475	2,2	10,9	13,1	83,4
B3-Lmed	2,422	2,475	2,1	10,9	13,1	83,7

Quadro I.28 – Características gerais das lajes de macadame betuminoso, provenientes dos trechos experimentais, usadas nos ensaios com simulador de tráfego (Misturas C1, C2 e C3)

PROVETE	Bm (g/cm ³)	Bt (g/cm ³)	n (%)	TVB (%)	VMA (%)	Sb (%)
C1-L01	2,386	2,506	4,8	9,4	14,2	66,3
C1-L02	2,385	2,506	4,8	9,4	14,2	66,1
C1-L03	2,353	2,506	6,1	9,3	15,4	60,3
C1-Lmed	2,375	2,506	5,2	9,4	14,6	64,2
C2-L01	2,424	2,495	2,8	10,7	13,6	79,0
C2-L02	2,355	2,495	5,6	10,4	16,0	65,0
C2-L03	2,416	2,495	3,2	10,7	13,9	77,1
C2-Lmed	2,398	2,495	3,9	10,6	14,5	73,7
C3-L01	2,457	2,486	1,2	11,8	13,0	91,0
C3-L02	2,456	2,486	1,2	11,8	13,0	90,7
C3-L03	2,456	2,486	1,2	11,8	13,0	90,7
C3-Lmed	2,456	2,486	1,2	11,8	13,0	90,8

Quadro I.29 – Características gerais das lajes de macadame betuminoso, provenientes dos trechos experimentais, usadas nos ensaios com simulador de tráfego (Misturas D1, D2 e D3)

PROVETE	Bm (g/cm ³)	Bt (g/cm ³)	n (%)	TVB (%)	VMA (%)	Sb (%)
D1-L01	2,419	2,490	2,9	10,0	12,9	77,8
D1-L02	2,435	2,490	2,2	10,1	12,3	82,0
D1-L03	2,434	2,490	2,2	10,1	12,3	81,7
D1-Lmed	2,429	2,490	2,4	10,0	12,5	80,5
D2-L01	2,376	2,478	4,1	10,7	14,9	72,3
D2-L02	2,387	2,478	3,7	10,8	14,5	74,6
D2-L03	2,438	2,478	1,6	11,0	12,6	87,2
D2-Lmed	2,400	2,478	3,1	10,8	14,0	78,0
D3-L01	2,453	2,467	0,6	12,0	12,6	95,5
D3-L02	2,453	2,467	0,6	12,0	12,6	95,5
D3-L03	2,453	2,467	0,6	12,0	12,6	95,5
D3-Lmed	2,453	2,467	0,6	12,0	12,6	95,5

I.3 Módulos de Deformabilidade e Ângulos de Fase

A seguir apresenta-se um resumo dos resultados, em termos de módulos de deformabilidade e de ângulos de fase, para as doze misturas de macadame betuminoso aplicadas nos trechos experimentais, nas seguintes condições:

- Frequências de 10 Hz, 5 Hz e 1 Hz;
- Temperaturas de 15°C, 25°C e 40°C;
- Extensão controlada de 100 microns.

Quadro I.30 – Módulos de deformabilidade e ângulos de fase da mistura A1

Provete	Temperatura (°C)	Módulo de Deformabilidade (MPa)			Ângulo de Fase (graus)		
		10 Hz	5 Hz	1 Hz	10 Hz	5 Hz	1 Hz
A1-V03	15	8554	7743	6340	10,3	12,0	13,4
A1-V04	15	8340	7896	6372	11,3	13,1	14,7
A1-V08	15	7641	6773	5664	10,9	11,5	13,4
Valor médio		8178	7471	6125	10,8	12,2	13,8
A1-V01	25	6135	5276	3378	23,0	25,6	28,5
A1-V02	25	5935	5058	3395	22,6	24,2	27,6
A1-V07	25	6030	5068	3073	22,4	26,0	29,5
Valor médio		6033	5134	3282	22,7	25,3	28,5
A1-V05	40	2225	1858	1290	40,5	39,6	33,1
A1-V09	40	2515	2008	1331	36,2	33,6	23,6
A1-V10	40	2222	1666	919	39,5	37,7	32,3
Valor médio		2321	1844	1180	38,7	37,0	29,7

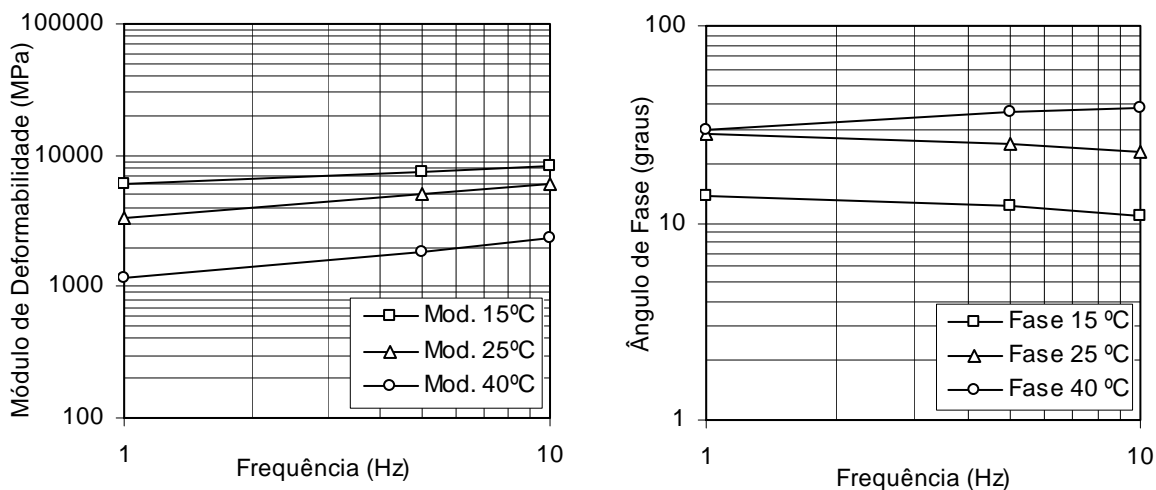


Figura I.1 – Variação do módulo de deformabilidade e do ângulo de fase da mistura A1

Quadro I.31 – Módulos de deformabilidade e ângulos de fase da mistura A2

Provete	Temperatura (°C)	Módulo de Deformabilidade (MPa)			Ângulo de Fase (graus)		
		10 Hz	5 Hz	1 Hz	10 Hz	5 Hz	1 Hz
A2-V04	15	9218	8261	6008	12,8	14,1	15,5
A2-V07	15	8887	8191	6056	13,1	14,9	16,0
A2-V09	15	8686	7922	6091	12,2	13,2	14,5
Valor médio		8930	8125	6052	12,7	14,1	15,3
A2-V01	25	5937	4693	3078	26,9	28,6	31,6
A2-V06	25	5723	4990	3216	22,0	26,1	29,4
A2-V10	25	6115	5111	3344	24,2	27,7	27,9
Valor médio		5925	4931	3213	24,4	27,5	29,6
A2-V08	40	2113	1843	1245	39,1	37,6	27,5
A2-V11	40	2060	1539	916	41,0	41,3	35,3
A2-V12	40	1906	1417	788	41,1	40,7	32,5
Valor médio		2026	1600	983	40,4	39,9	31,8

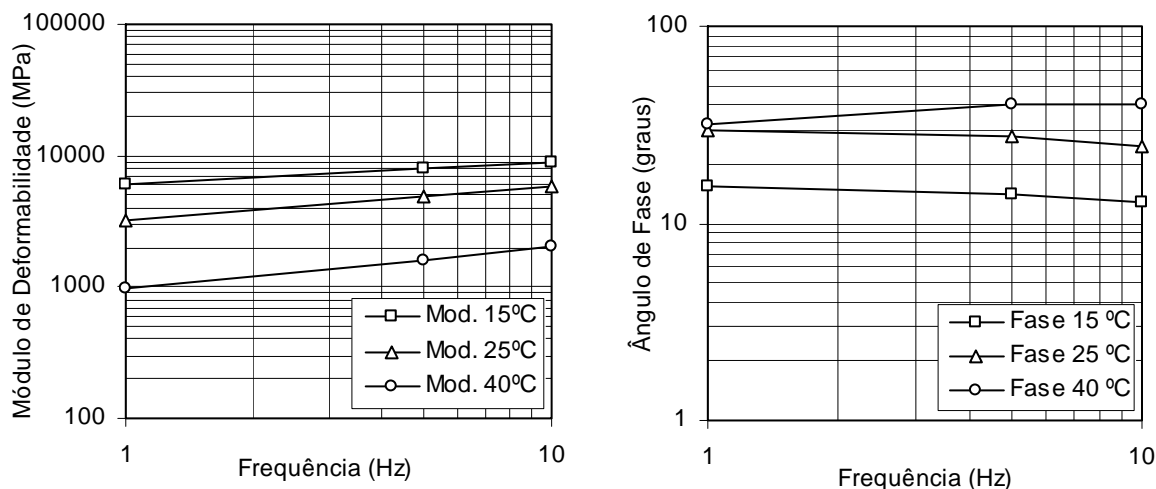


Figura I.2 – Variação do módulo de deformabilidade e do ângulo de fase da mistura A2

Quadro I.32 – Módulos de deformabilidade e ângulos de fase da mistura A3

Provete	Temperatura (°C)	Módulo de Deformabilidade (MPa)			Ângulo de Fase (graus)		
		10 Hz	5 Hz	1 Hz	10 Hz	5 Hz	1 Hz
A3-V03	15	8370	7708	5678	14,2	15,9	17,0
A3-V05	15	9284	8553	6617	13,5	14,0	15,8
A3-V07	15	8947	7983	6401	14,3	14,9	17,6
Valor médio		8867	8081	6232	14,0	14,9	16,8
A3-V01	25	6175	5012	3109	27,1	30,1	30,5
A3-V02	25	5981	4921	2942	25,5	28,9	31,4
A3-V06	25	5345	4671	2817	25,2	27,1	32,6
Valor médio		5834	4868	2956	25,9	28,7	31,5
A3-V04	40	1833	1426	839	39,1	38,6	25,9
A3-V08	40	1761	1369	793	40,7	38,4	28,7
A3-V09	40	1995	1413	819	42,3	41,0	35,1
Valor médio		1863	1403	817	40,7	39,3	29,9

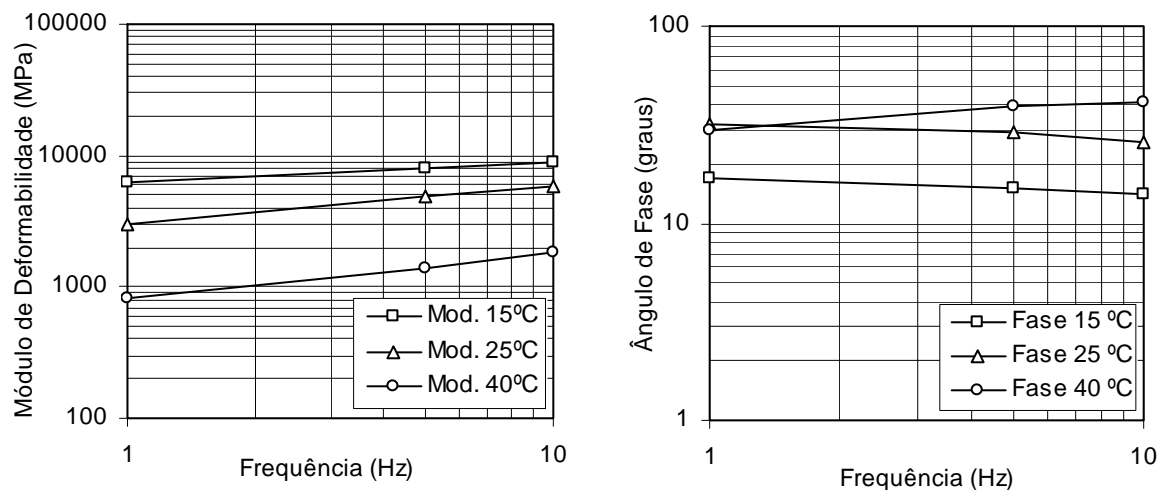


Figura I.3 – Variação do módulo de deformabilidade e do ângulo de fase da mistura A3

Quadro I.33 – Módulos de deformabilidade e ângulos de fase da mistura B1

Provete	Temperatura (°C)	Módulo de Deformabilidade (MPa)			Ângulo de Fase (graus)		
		10 Hz	5 Hz	1 Hz	10 Hz	5 Hz	1 Hz
B1-V03	15	10784	9815	7647	11,5	12,6	14,2
B1-V06	15	8085	7708	6228	9,9	11,5	11,3
B1-V08	15	8346	8010	6261	10,4	11,2	12,4
Valor médio		9072	8511	6712	10,6	11,8	12,6
B1-V01	25	5988	5052	3152	21,4	25,2	27,3
B1-V05	25	6320	5149	3264	23,6	24,4	28,8
B1-V07	25	5934	5377	3424	21,7	23,9	26,7
Valor médio		6081	5193	3280	22,2	24,5	27,6
B1-V04	40	2562	1905	1165	38,6	37,8	31,2
B1-V09	40	2579	1937	1162	37,4	37,3	32,3
B1-V10	40	2618	1975	1070	36,0	39,2	32,2
Valor médio		2586	1939	1132	37,3	38,1	31,9

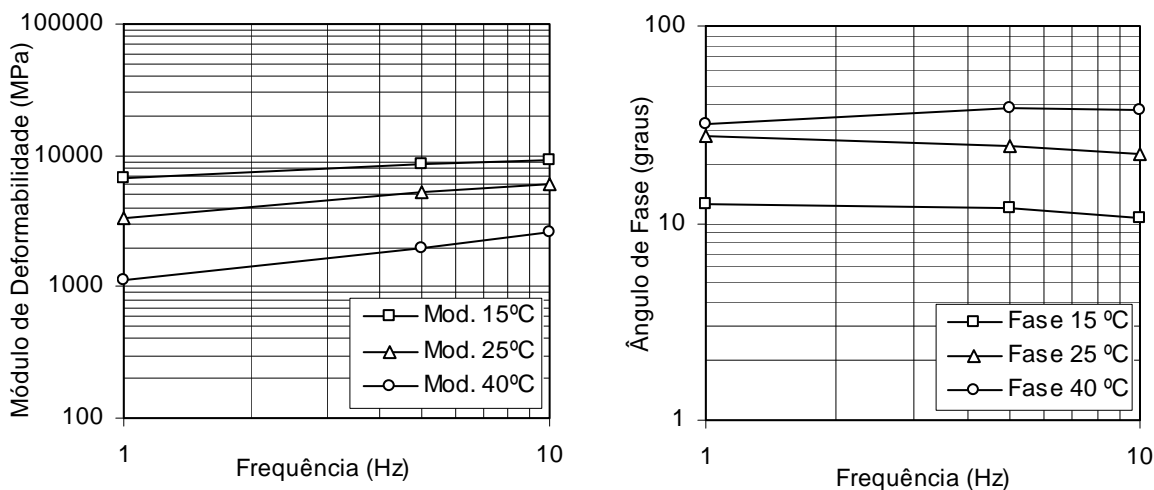


Figura I.4 – Variação do módulo de deformabilidade e do ângulo de fase da mistura B1

Quadro I.34 – Módulos de deformabilidade e ângulos de fase da mistura B2

Provete	Temperatura (°C)	Módulo de Deformabilidade (MPa)			Ângulo de Fase (graus)		
		10 Hz	5 Hz	1 Hz	10 Hz	5 Hz	1 Hz
B2-V02	15	9074	8575	6918	12,6	13,0	14,4
B2-V05	15	8779	8310	6413	12,3	13,2	14,1
B2-V07	15	10067	8969	7398	12,3	14,4	16,2
Valor médio		9307	8618	6910	12,4	13,5	14,9
B2-V01	25	5835	5221	3412	25,2	28,5	30,4
B2-V03	25	6083	5421	3770	20,5	22,9	25,2
B2-V06	25	6341	5324	3358	24,9	27,1	30,1
Valor médio		6086	5322	3513	23,5	26,2	28,6
B2-V04	40	2151	1665	1005	39,0	39,4	31,8
B2-V08	40	2267	1623	926	38,3	39,3	34,0
B2-V09	40	2176	1647	994	40,0	38,2	32,3
Valor médio		2198	1645	975	39,1	39,0	32,7

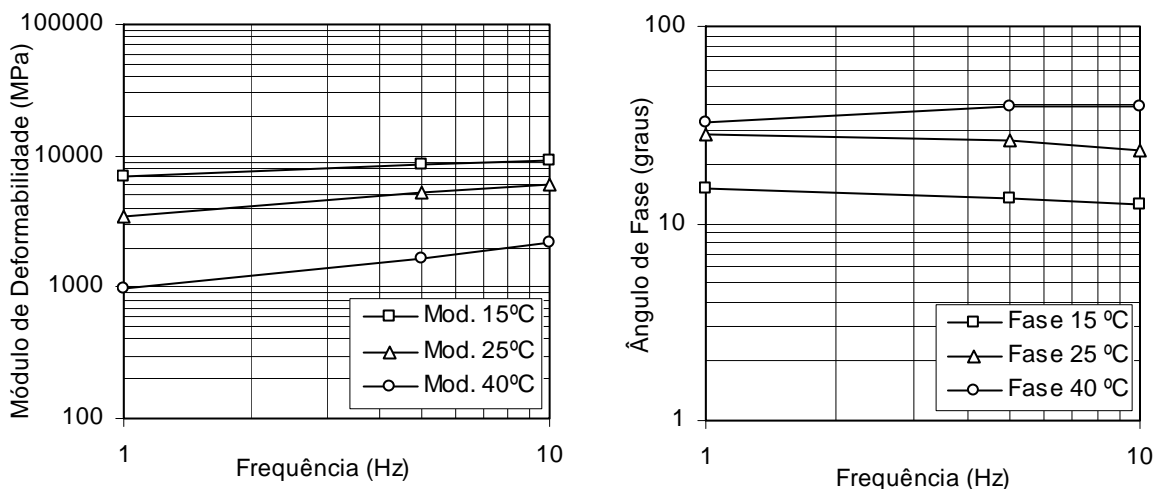


Figura I.5 – Variação do módulo de deformabilidade e do ângulo de fase da mistura B2

Quadro I.35 – Módulos de deformabilidade e ângulos de fase da mistura B3

Provete	Temperatura (°C)	Módulo de Deformabilidade (MPa)			Ângulo de Fase (graus)		
		10 Hz	5 Hz	1 Hz	10 Hz	5 Hz	1 Hz
B3-V03	15	8049	7873	6065	14,0	15,0	17,0
B3-V05	15	7981	7809	5962	14,0	13,9	16,5
B3-V08	15	10576	9372	6666	13,0	16,1	17,5
Valor médio		8869	8351	6231	13,7	15,0	17,0
B3-V01	25	5163	4455	2718	23,4	26,3	30,2
B3-V02	25	5637	4962	3204	23,3	24,7	29,3
B3-V06	25	6131	4971	3005	25,1	27,4	28,0
Valor médio		5644	4796	2976	23,9	26,1	29,2
B3-V04	40	2070	1589	869	40,8	39,7	33,2
B3-V07	40	2089	1503	990	38,9	38,0	31,1
B3-V09	40	1875	1385	789	40,3	40,0	32,4
Valor médio		2011	1492	883	40,0	39,2	32,2

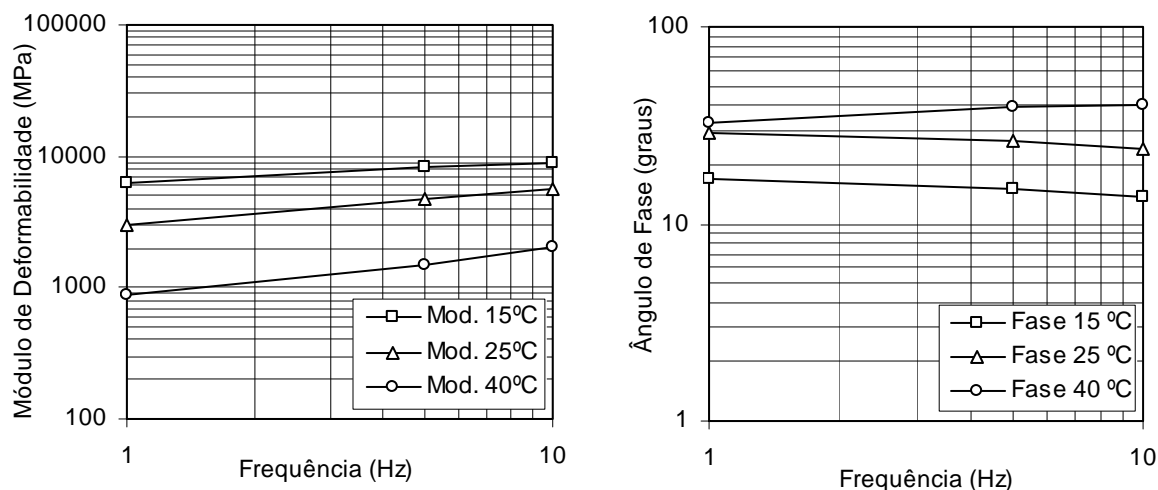


Figura I.6 – Variação do módulo de deformabilidade e do ângulo de fase da mistura B3

Quadro I.36 – Módulos de deformabilidade e ângulos de fase da mistura C1

Provete	Temperatura (°C)	Módulo de Deformabilidade (MPa)			Ângulo de Fase (graus)		
		10 Hz	5 Hz	1 Hz	10 Hz	5 Hz	1 Hz
C1-V02	15	9445	8712	6548	12,5	12,2	14,2
C1-V05	15	8289	8110	6802	11,2	12,1	12,5
C1-V07	15	9472	8745	7013	9,8	9,2	11,8
Valor médio		9069	8522	6788	11,2	11,2	12,8
C1-V01	25	5221	4697	3098	23,0	25,7	27,0
C1-V04	25	5844	5188	3357	22,6	24,9	27,5
C1-V09	25	7378	5976	4007	24,5	25,5	27,1
Valor médio		6148	5287	3487	23,4	25,4	27,2
C1-V03	40	2709	1998	1113	35,8	36,0	30,3
C1-V06	40	2628	2002	1153	35,1	34,8	27,6
C1-V08	40	2858	2148	1156	35,8	37,3	32,8
Valor médio		2732	2049	1141	35,6	36,0	30,2

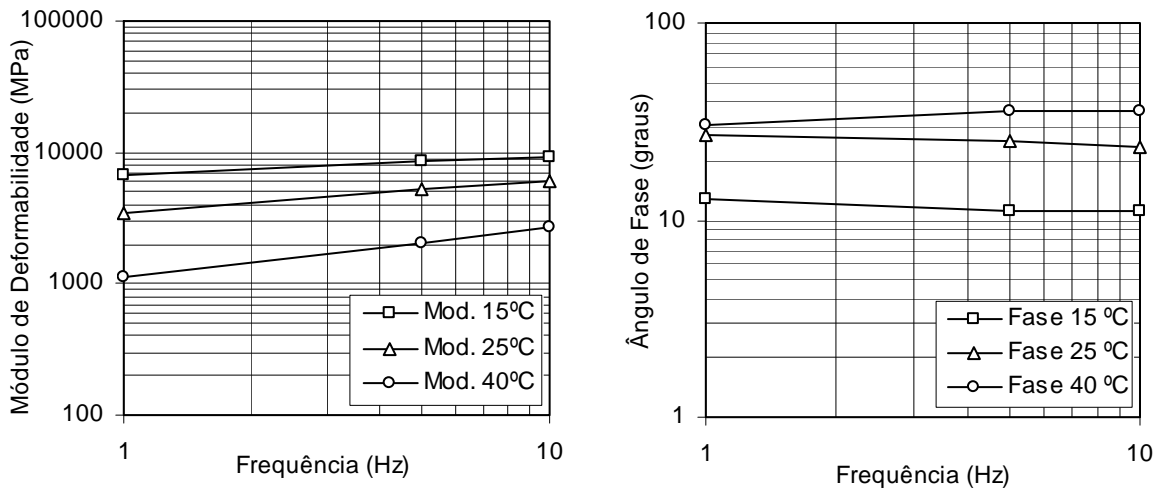


Figura I.7 – Variação do módulo de deformabilidade e do ângulo de fase da mistura C1

Quadro I.37 – Módulos de deformabilidade e ângulos de fase da mistura C2

Provete	Temperatura (°C)	Módulo de Deformabilidade (MPa)			Ângulo de Fase (graus)		
		10 Hz	5 Hz	1 Hz	10 Hz	5 Hz	1 Hz
C2-V04	15	8783	8142	5648	12,0	12,5	13,3
C2-V06	15	9593	8630	6807	12,5	12,7	13,8
C2-V10	15	7627	7074	5323	12,1	13,0	11,8
Valor médio		8668	7949	5926	12,2	12,7	13,0
C2-V01	25	5470	4588	2814	23,8	25,3	25,5
C2-V03	25	6178	5060	3600	21,3	23,8	24,9
C2-V08	25	6131	5098	3256	21,7	24,3	25,4
Valor médio		5926	4915	3223	22,3	24,5	25,3
C2-V05	40	2077	1613	969	38,3	40,3	35,8
C2-V09	40	2538	1938	1197	36,6	37,4	32,2
C2-V11	40	2235	1701	966	37,0	38,2	32,2
Valor médio		2283	1751	1044	37,3	38,6	33,4

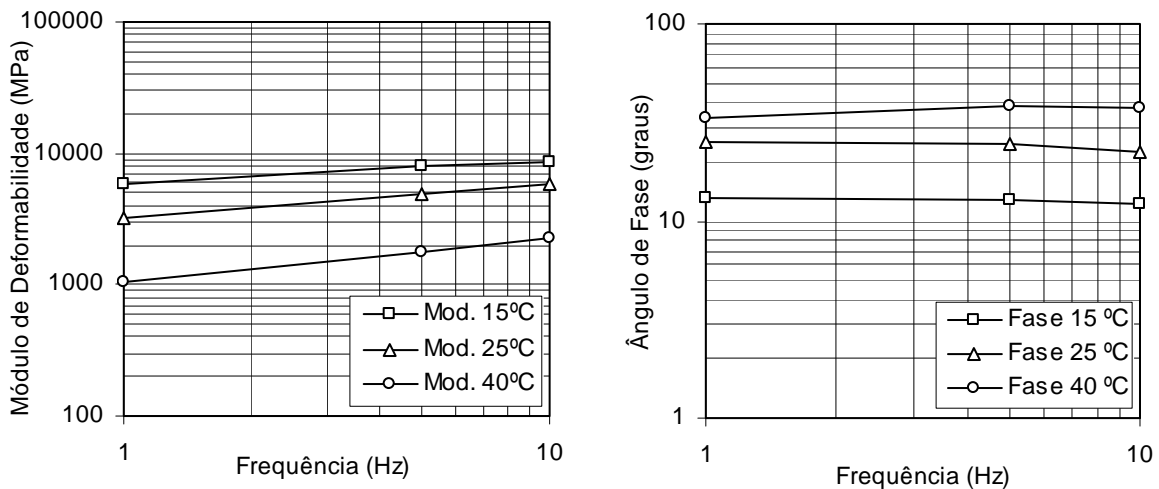


Figura I.8 – Variação do módulo de deformabilidade e do ângulo de fase da mistura C2

Quadro I.38 – Módulos de deformabilidade e ângulos de fase da mistura C3

Provete	Temperatura (°C)	Módulo de Deformabilidade (MPa)			Ângulo de Fase (graus)		
		10 Hz	5 Hz	1 Hz	10 Hz	5 Hz	1 Hz
C3-V03	15	9592	9011	6770	12,8	13,7	15,2
C3-V05	15	10148	9241	6678	13,9	15,8	17,6
C3-V08	15	8408	8281	5845	12,5	13,8	17,3
Valor médio		9383	8844	6431	13,1	14,4	16,7
C3-V01	25	5564	4719	2801	26,7	29,6	31,4
C3-V02	25	6173	5094	3293	25,0	28,2	29,9
C3-V06	25	5907	5078	2982	25,0	28,3	29,0
Valor médio		5881	4964	3025	25,6	28,7	30,1
C3-V04	40	2041	1580	934	40,0	40,0	32,3
C3-V07	40	2014	1555	898	41,4	42,4	35,1
C3-V09	40	2008	1516	815	40,1	42,6	36,6
Valor médio		2021	1550	882	40,5	41,7	34,7

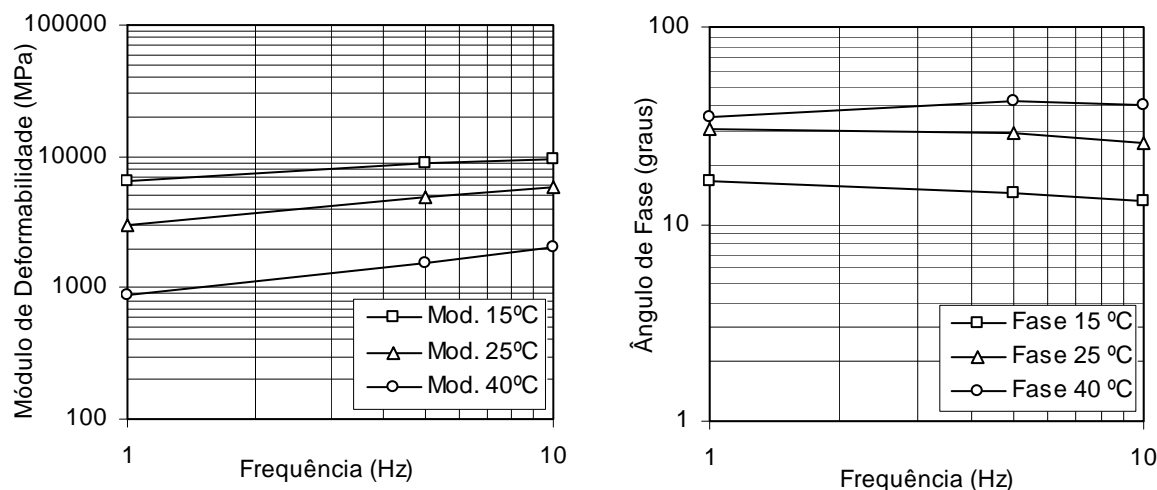


Figura I.9 – Variação do módulo de deformabilidade e do ângulo de fase da mistura C3

Quadro I.39 – Módulos de deformabilidade e ângulos de fase da mistura D1

Provete	Temperatura (°C)	Módulo de Deformabilidade (MPa)			Ângulo de Fase (graus)		
		10 Hz	5 Hz	1 Hz	10 Hz	5 Hz	1 Hz
D1-V05	15	9072	8196	6782	11,0	11,0	12,5
D1-V08	15	9102	8694	6865	11,2	11,7	13,7
D1-V10	15	9387	9109	6226	13,2	11,3	13,7
Valor médio		9187	8666	6624	11,8	11,3	13,3
D1-V01	25	6011	5262	3057	23,6	25,5	28,6
D1-V04	25	6377	5503	3603	21,3	23,5	25,7
D1-V06	25	7316	6196	3909	22,1	22,6	25,0
Valor médio		6568	5654	3523	22,3	23,9	26,4
D1-V03	40	2615	2003	1223	37,0	37,1	30,2
D1-V07	40	2811	2153	1315	35,6	36,6	32,0
D1-V09	40	2846	2196	1180	35,6	36,7	31,9
Valor médio		2757	2117	1239	36,1	36,8	31,4

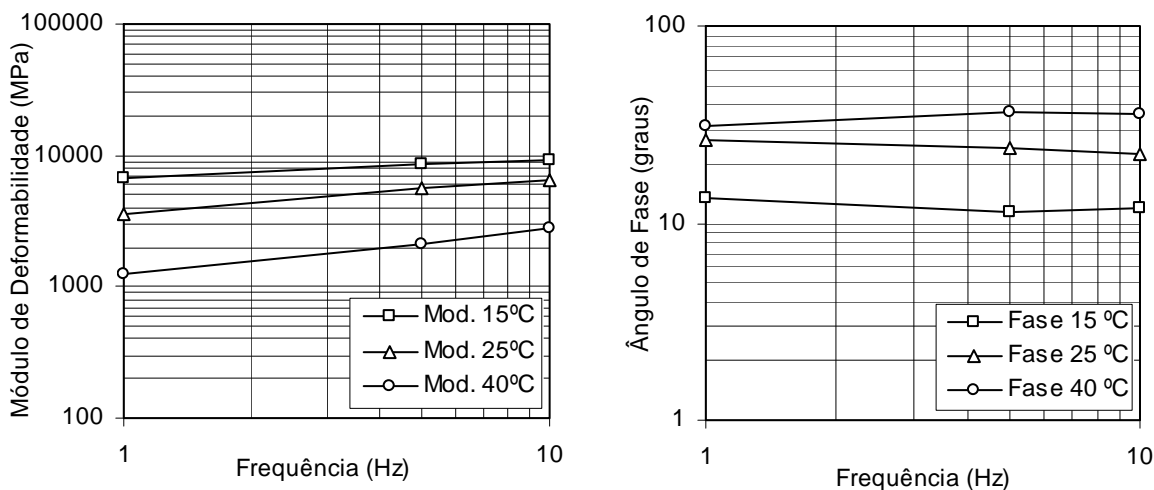


Figura I.10 – Variação do módulo de deformabilidade e do ângulo de fase da mistura D1

Quadro I.40 – Módulos de deformabilidade e ângulos de fase da mistura D2

Provete	Temperatura (°C)	Módulo de Deformabilidade (MPa)			Ângulo de Fase (graus)		
		10 Hz	5 Hz	1 Hz	10 Hz	5 Hz	1 Hz
D2-V03	15	9432	8810	7056	11,7	12,1	13,3
D2-V05	15	9099	7931	6516	11,2	12,4	13,5
D2-V09	15	9361	9177	6037	10,9	12,1	12,1
Valor médio		9297	8639	6536	11,3	12,2	13,0
D2-V01	25	5528	4747	2820	22,9	25,3	26,4
D2-V02	25	6317	5512	3720	18,4	21,8	24,3
D2-V07	25	6877	6075	3671	20,1	21,9	25,7
Valor médio		6241	5445	3404	20,5	23,0	25,5
D2-V04	40	2297	1734	1012	37,5	36,6	31,8
D2-V08	40	2590	1992	1178	36,6	36,7	30,6
D2-V10	40	2513	1946	1141	35,9	36,5	30,7
Valor médio		2467	1891	1110	36,7	36,6	31,0

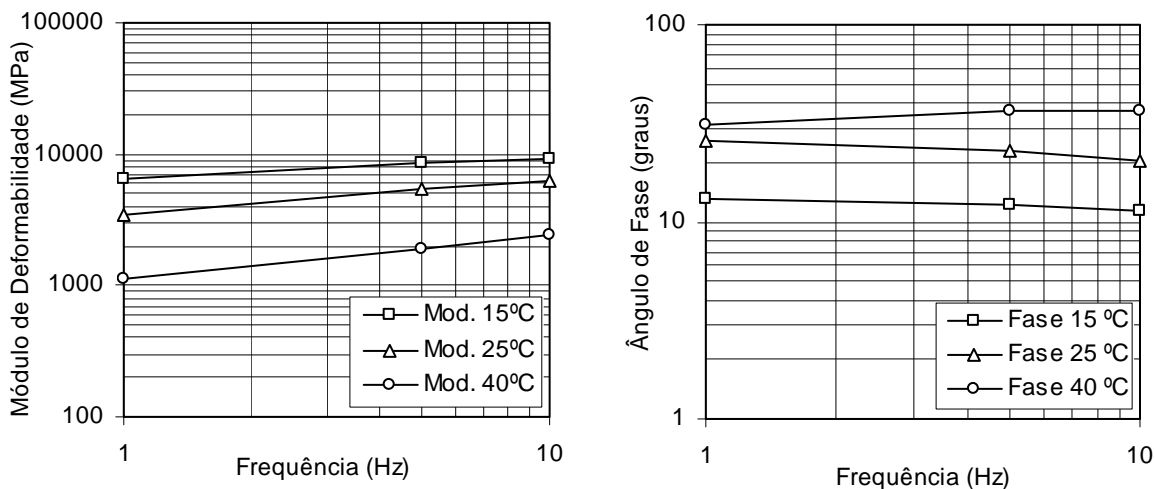


Figura I.11 – Variação do módulo de deformabilidade e do ângulo de fase da mistura D2

Quadro I.41 – Módulos de deformabilidade e ângulos de fase da mistura D3

Provete	Temperatura (°C)	Módulo de Deformabilidade (MPa)			Ângulo de Fase (graus)		
		10 Hz	5 Hz	1 Hz	10 Hz	5 Hz	1 Hz
D3-V03	15	7621	7261	5832	13,3	13,9	16,5
D3-V05	15	10508	9406	6365	14,9	15,8	17,7
D3-V08	15	8909	8232	5332	14,5	15,2	17,1
Valor médio		9013	8300	5843	14,2	15,0	17,1
D3-V01	25	5339	4555	2836	25,7	26,8	30,0
D3-V02	25	5445	4464	3062	24,3	27,1	29,4
D3-V06	25	5283	4512	2614	25,4	27,8	31,2
Valor médio		5356	4510	2837	25,1	27,2	30,2
D3-V04	40	1965	1463	854	40,3	43,0	36,7
D3-V07	40	1878	1415	873	38,6	39,4	33,6
D3-V09	40	1962	1480	856	39,3	39,4	37,0
Valor médio		1935	1453	861	39,4	40,6	35,8

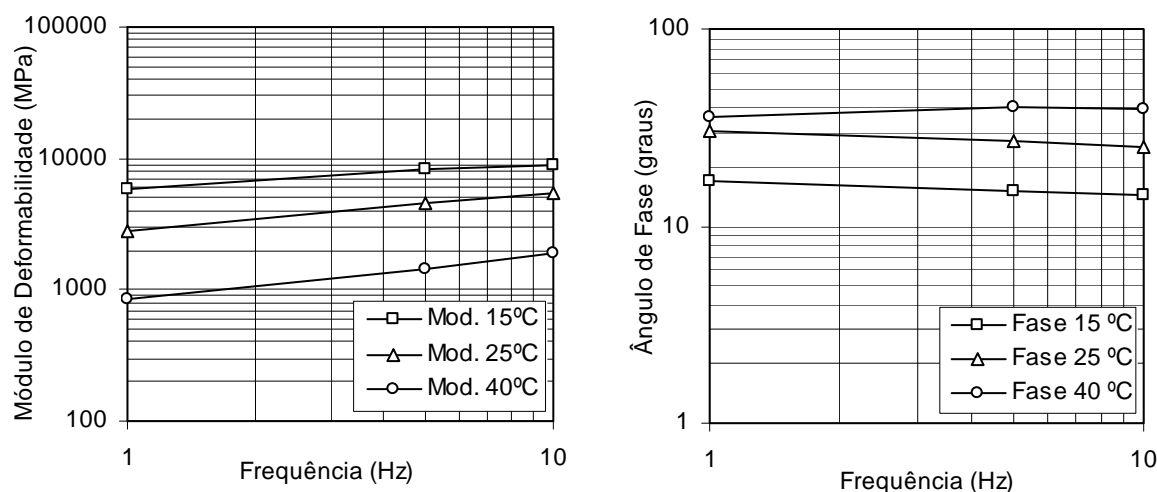


Figura I.12 – Variação do módulo de deformabilidade e do ângulo de fase da mistura D3

Quadro I.42 – Resumo da média dos módulos de deformabilidade e dos ângulos de fase das misturas provenientes dos trechos experimentais (temperatura de 15 °C)

Mistura	Temperatura (°C)	Módulo de Deformabilidade (MPa)			Ângulo de Fase (graus)		
		10 Hz	5 Hz	1 Hz	10 Hz	5 Hz	1 Hz
A1	15	8178	7471	6125	10,8	12,2	13,8
A2	15	8930	8125	6052	12,7	14,1	15,3
A3	15	8867	8081	6232	14,0	14,9	16,8
B1	15	9072	8511	6712	10,6	11,8	12,6
B2	15	9307	8618	6910	12,4	13,5	14,9
B3	15	8869	8351	6231	13,7	15,0	17,0
C1	15	9069	8522	6788	11,2	11,2	12,8
C2	15	8668	7949	5926	12,2	12,7	13,0
C3	15	9383	8844	6431	13,1	14,4	16,7
D1	15	9187	8666	6624	11,8	11,3	13,3
D2	15	9297	8639	6536	11,3	12,2	13,0
D3	15	9013	8300	5843	14,2	15,0	17,1

Quadro I.43 – Resumo da média dos módulos de deformabilidade e dos ângulos de fase das misturas provenientes dos trechos experimentais (temperatura de 25 °C)

Mistura	Temperatura (°C)	Módulo de Deformabilidade (MPa)			Ângulo de Fase (graus)		
		10 Hz	5 Hz	1 Hz	10 Hz	5 Hz	1 Hz
A1	25	6033	5134	3282	22,7	25,3	28,5
A2	25	5925	4931	3213	24,4	27,5	29,6
A3	25	5834	4868	2956	25,9	28,7	31,5
B1	25	6081	5193	3280	22,2	24,5	27,6
B2	25	6086	5322	3513	23,5	26,2	28,6
B3	25	5644	4796	2976	23,9	26,1	29,2
C1	25	6148	5287	3487	23,4	25,4	27,2
C2	25	5926	4915	3223	22,3	24,5	25,3
C3	25	5881	4964	3025	25,6	28,7	30,1
D1	25	6568	5654	3523	22,3	23,9	26,4
D2	25	6241	5445	3404	20,5	23,0	25,5
D3	25	5356	4510	2837	25,1	27,2	30,2

Quadro I.44 – Resumo da média dos módulos de deformabilidade e dos ângulos de fase das misturas provenientes dos trechos experimentais (temperatura de 40 °C)

Mistura	Temperatura (°C)	Módulo de Deformabilidade (MPa)			Ângulo de Fase (graus)		
		10 Hz	5 Hz	1 Hz	10 Hz	5 Hz	1 Hz
A1	40	2321	1844	1180	38,7	37,0	29,7
A2	40	2026	1600	983	40,4	39,9	31,8
A3	40	1863	1403	817	40,7	39,3	29,9
B1	40	2586	1939	1132	37,3	38,1	31,9
B2	40	2198	1645	975	39,1	39,0	32,7
B3	40	2011	1492	883	40,0	39,2	32,2
C1	40	2732	2049	1141	35,6	36,0	30,2
C2	40	2283	1751	1044	37,3	38,6	33,4
C3	40	2021	1550	882	40,5	41,7	34,7
D1	40	2757	2117	1239	36,1	36,8	31,4
D2	40	2467	1891	1110	36,7	36,6	31,0
D3	40	1935	1453	861	39,4	40,6	35,8

I.4 Resistência à Fadiga

A seguir apresenta-se um resumo dos resultados de avaliação da resistência à fadiga, para as doze misturas aplicadas nos trechos experimentais, obtidos nas seguintes condições:

- Frequência de 10 Hz;
- Temperatura de 25°C;
- Três níveis de extensão.

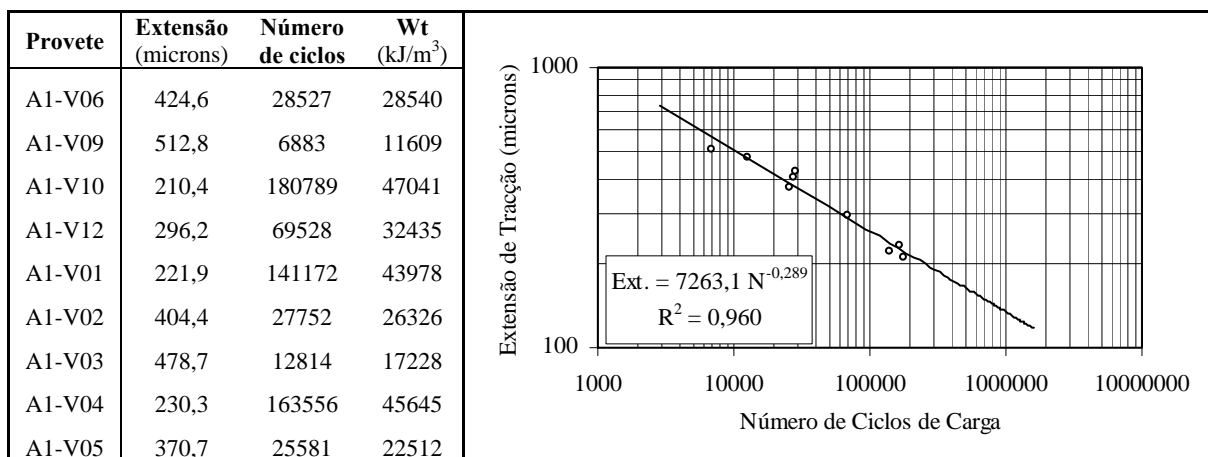


Figura I.13 – Lei de fadiga da mistura A1

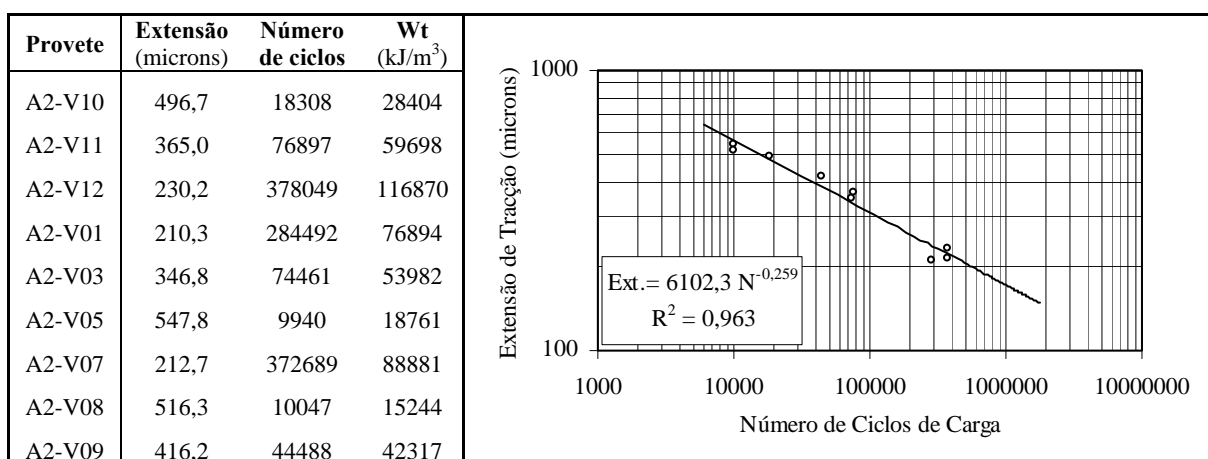


Figura I.14 – Lei de fadiga da mistura A2

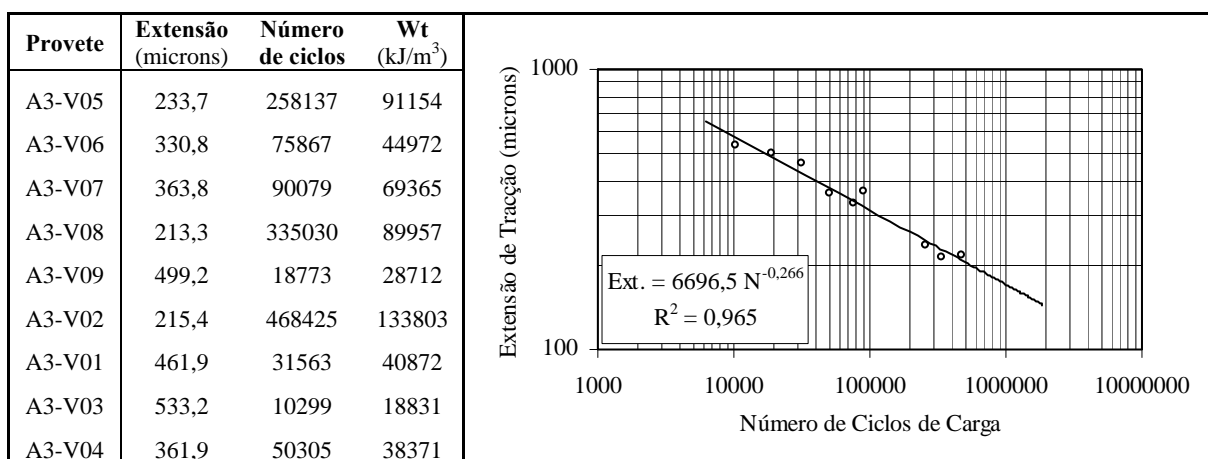


Figura I.15 – Lei de fadiga da mistura A3

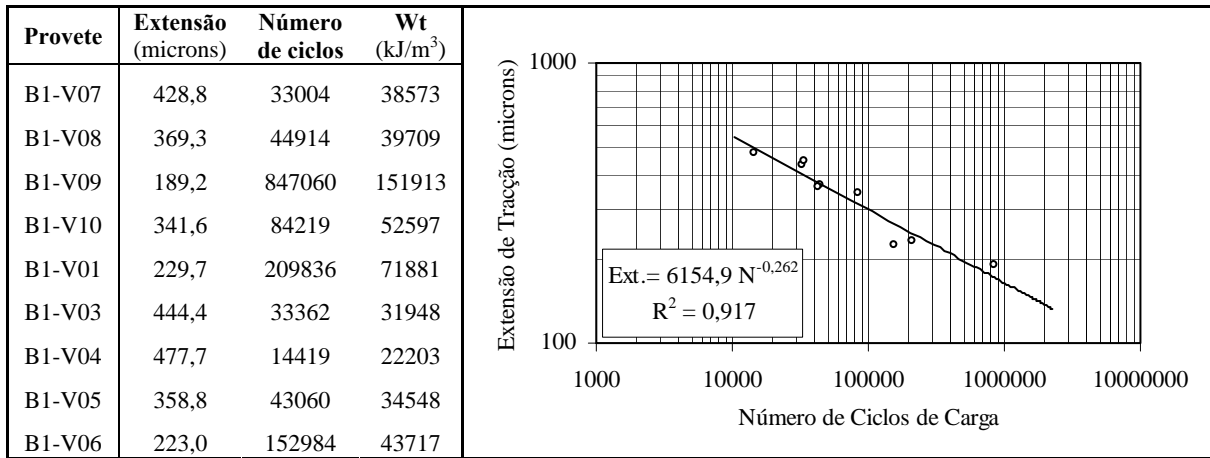


Figura I.16 – Lei de fadiga da mistura B1

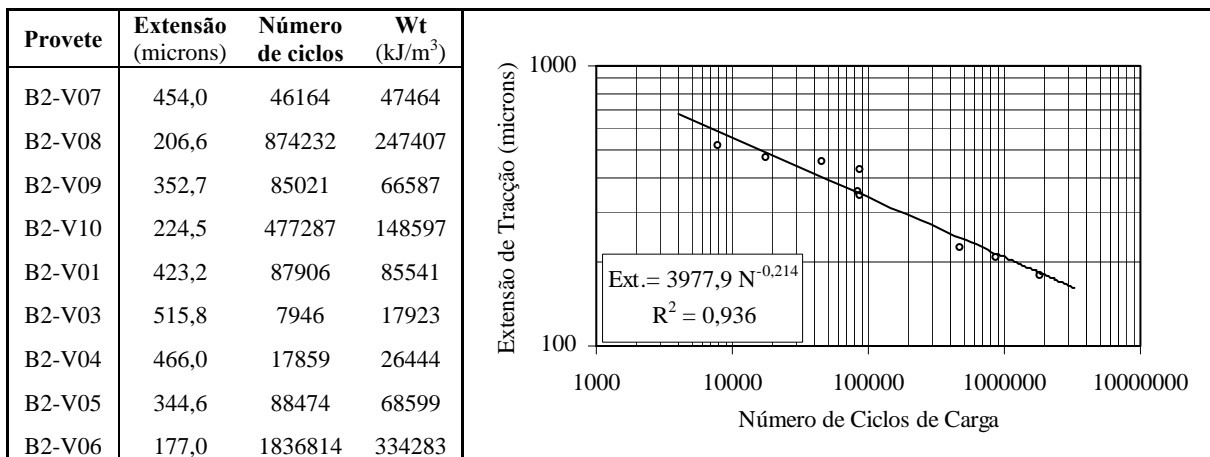


Figura I.17 – Lei de fadiga da mistura B2

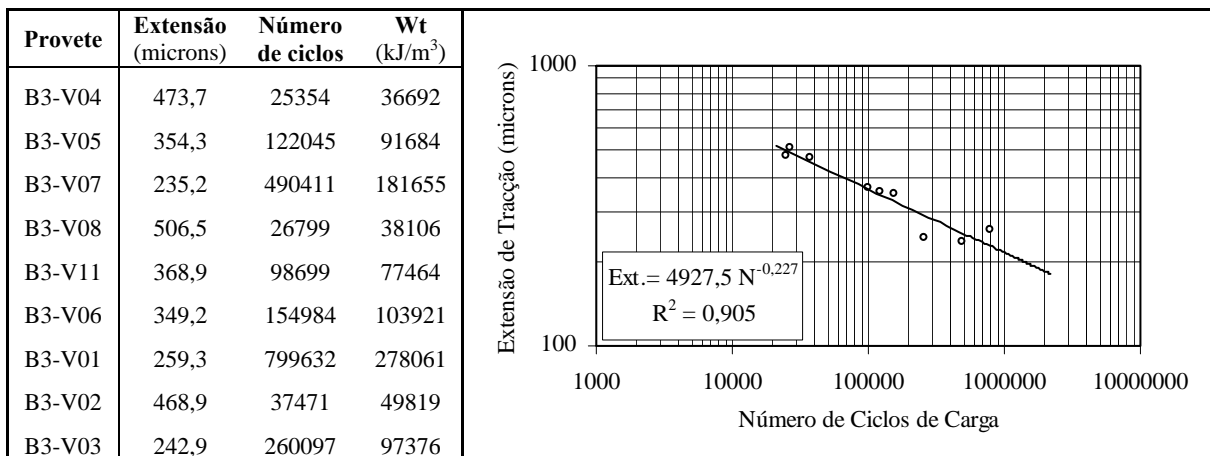


Figura I.18 – Lei de fadiga da mistura B3

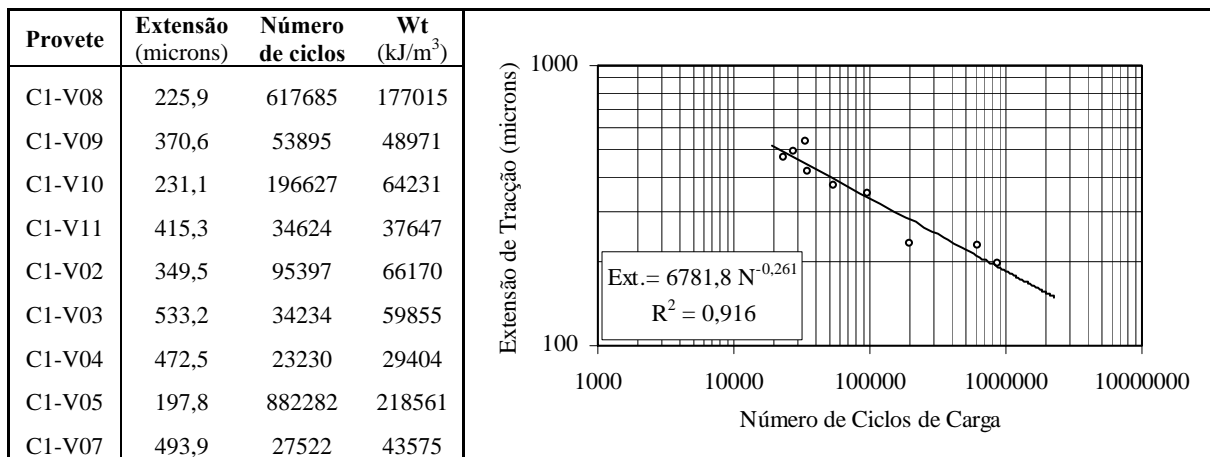


Figura I.19 – Lei de fadiga da mistura C1

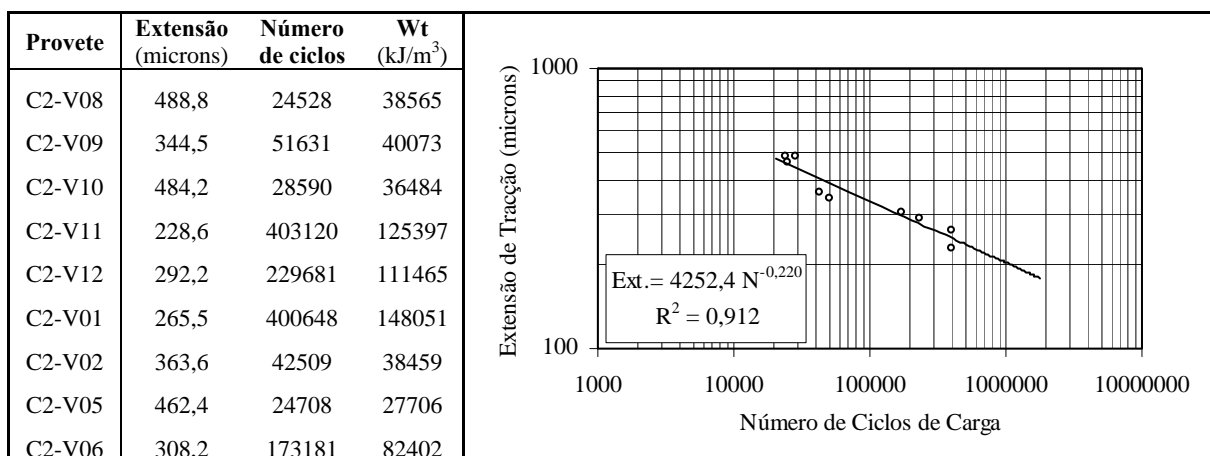


Figura I.20 – Lei de fadiga da mistura C2

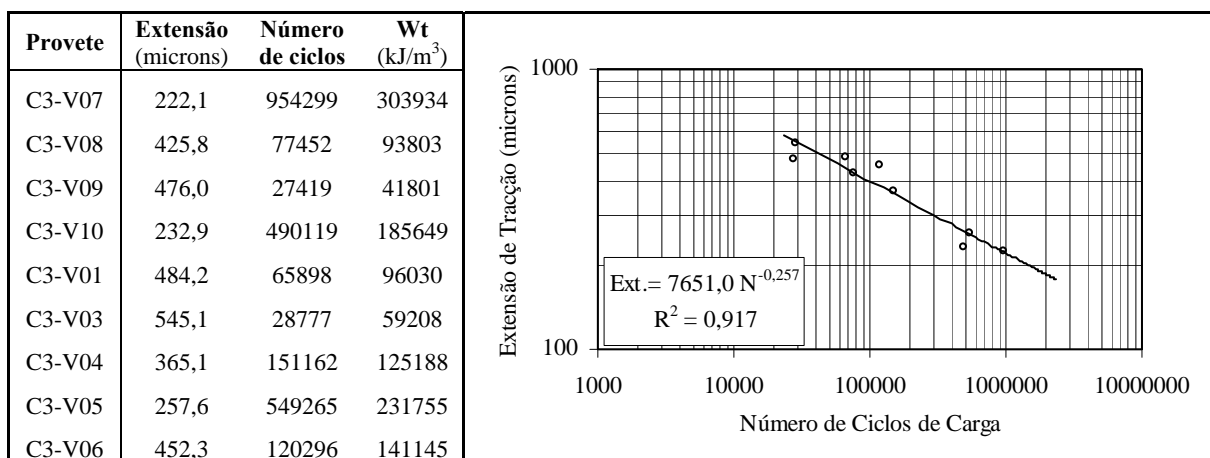


Figura I.21 – Lei de fadiga da mistura C3

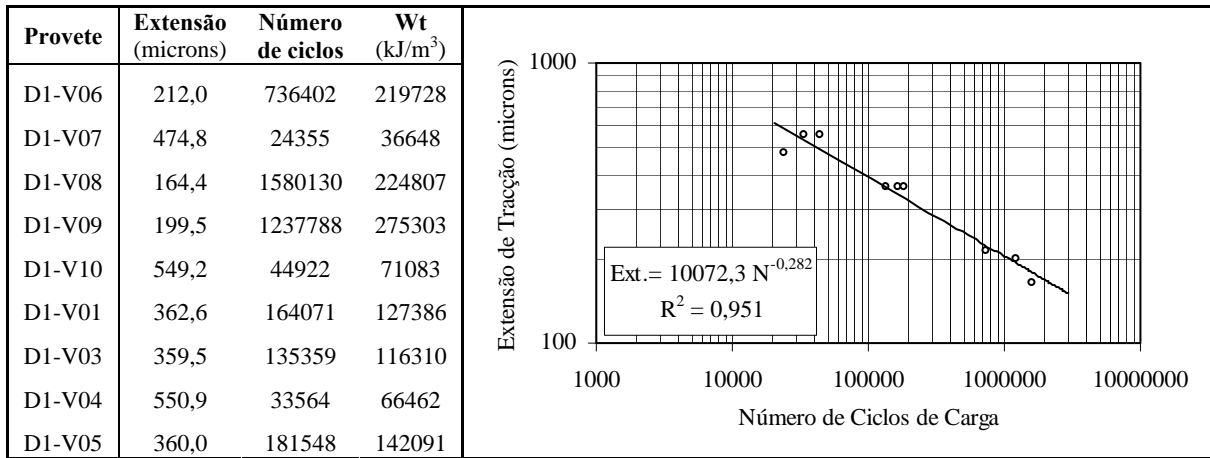


Figura I.22 – Lei de fadiga da mistura D1

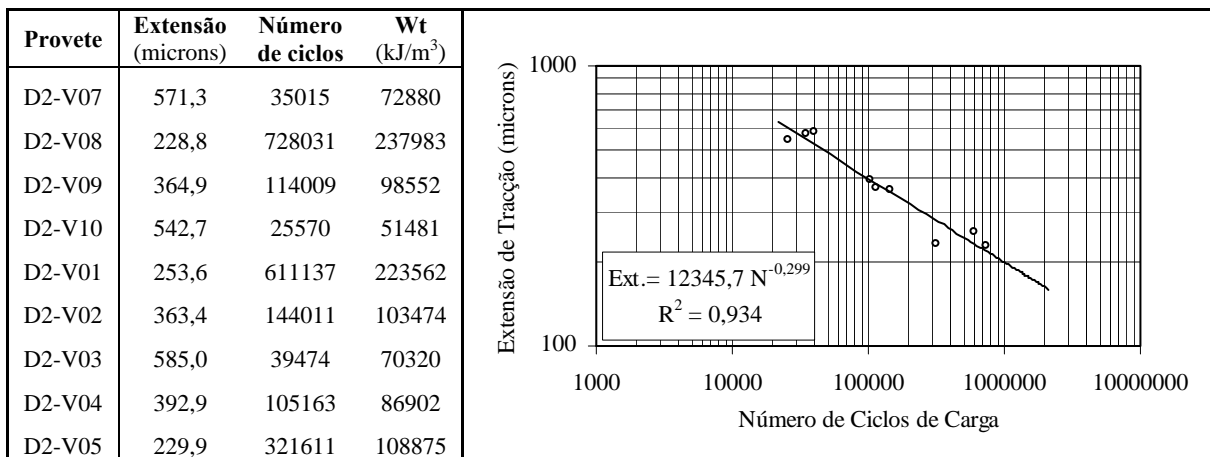


Figura I.23 – Lei de fadiga da mistura D2

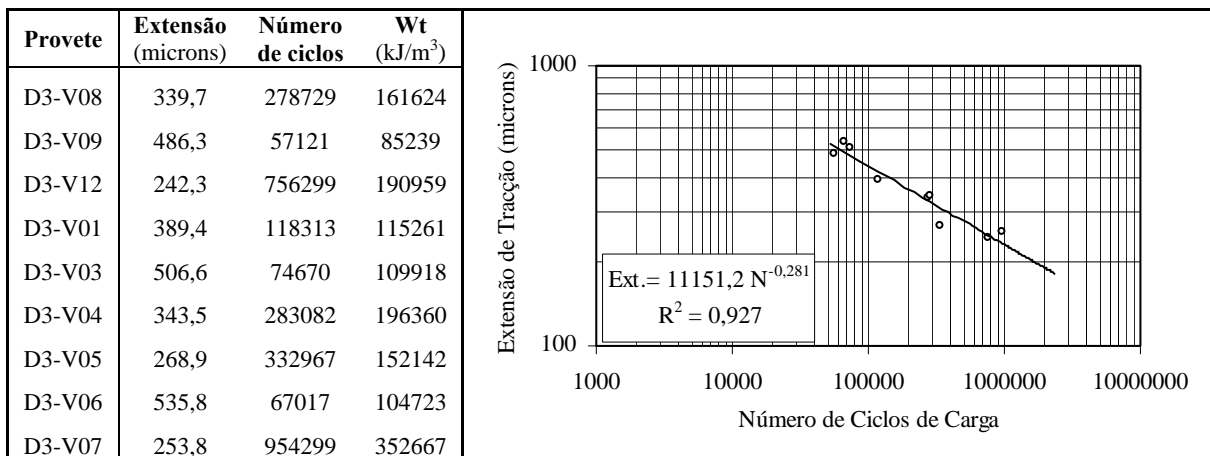


Figura I.24 – Lei de fadiga da mistura D3

Quadro I.45 – Resumo dos parâmetros das leis de fadiga das misturas aplicadas nos trechos experimentais e extensão correspondente a um milhão de ciclos (ϵ_6)

Mistura	A	B	ϵ_6 (microns)
A1	7263,1	-0,289	134
A2	6102,3	-0,259	170
A3	6696,5	-0,266	171
B1	6154,9	-0,262	164
B2	3977,9	-0,214	207
B3	4927,5	-0,227	215
C1	6781,8	-0,261	184
C2	4252,4	-0,220	202
C3	7651,0	-0,257	220
D1	10072,3	-0,282	204
D2	12345,7	-0,299	199
D3	11151,2	-0,281	230

1.5 Resistência à Deformação Permanente

O desempenho à deformação permanente das misturas de macadame betuminoso, aplicadas nos trechos experimentais, foi avaliado recorrendo aos seguintes ensaios:

- Ensaios de compressão uniaxial;
- Ensaios de compressão triaxial;
- Ensaios com simulador de tráfego.

A temperatura de ensaio foi, em todos os ensaios, de 45°C.

Os ensaios de compressão uniaxial foram realizados para uma tensão máxima de 150 kPa e os triaxiais para uma tensão de confinamento de 200 kPa e uma tensão deviatória de 400 kPa. Em ambos os casos, o carregamento respeitou uma frequência de 1 Hz com repouso de 1 segundo e a duração do ensaio foi 3600 ciclos.

Nos resultados que se seguem, primeiro relativos aos ensaios uniaxiais e depois relativos aos triaxiais, indicam-se os valores dos seguintes parâmetros: altura do provete (h) em mm; a extensão axial permanente no final do ensaio (ϵ_{3600}) em microns; a velocidade de deformação (V_{def}) em microns/ciclo; o módulo de fluência (S_N) em MPa; o módulo resiliente (E_r) em MPa; os parâmetros A e B de ajuste à curva de deformação do tipo $\epsilon_N = AN^B$ e a extensão correspondente ao ciclo 1000 ($\epsilon_{1000,calc}$) expressa em microns.

No final apresentam-se os resultados dos ensaios com simulador de tráfego, indicando a espessura das lajes ensaiadas, a deformação e a velocidade de deformação.

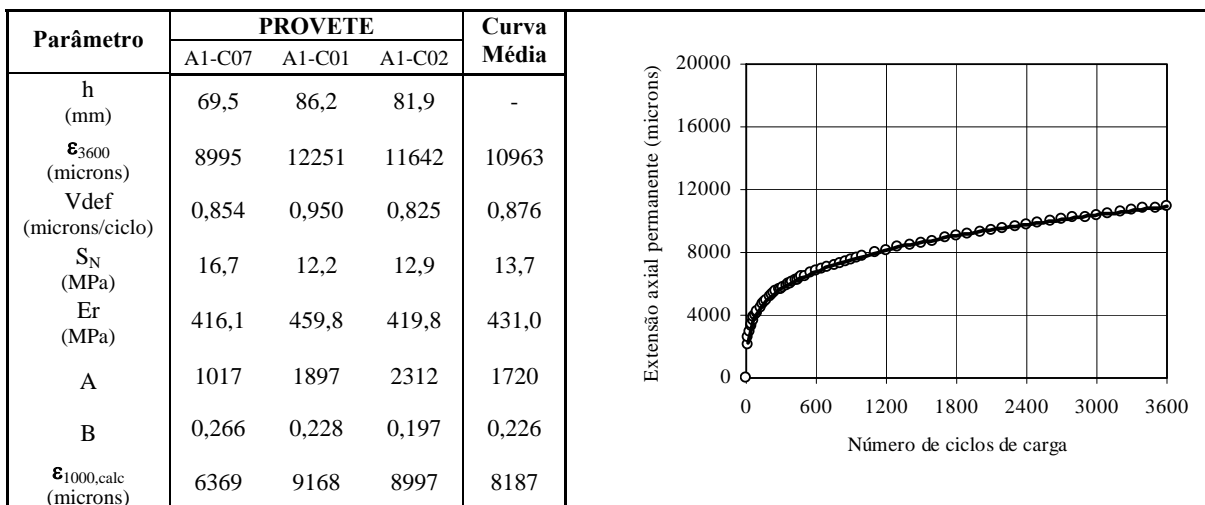


Figura I.25 – Curvas de deformação axial permanente (mistura A1) e respectivos parâmetros

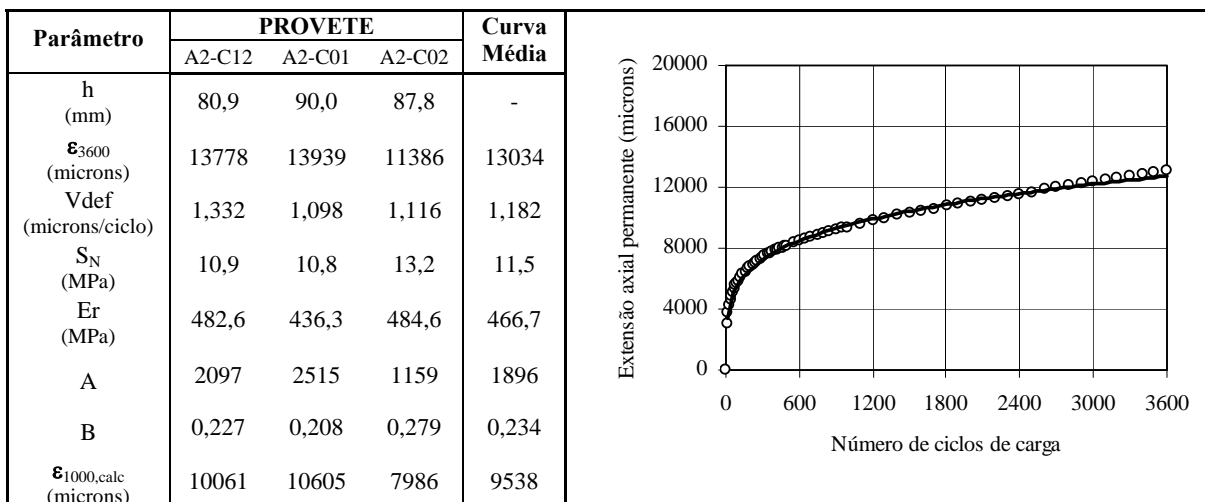


Figura I.26 – Curvas de deformação axial permanente (mistura A2) e respectivos parâmetros

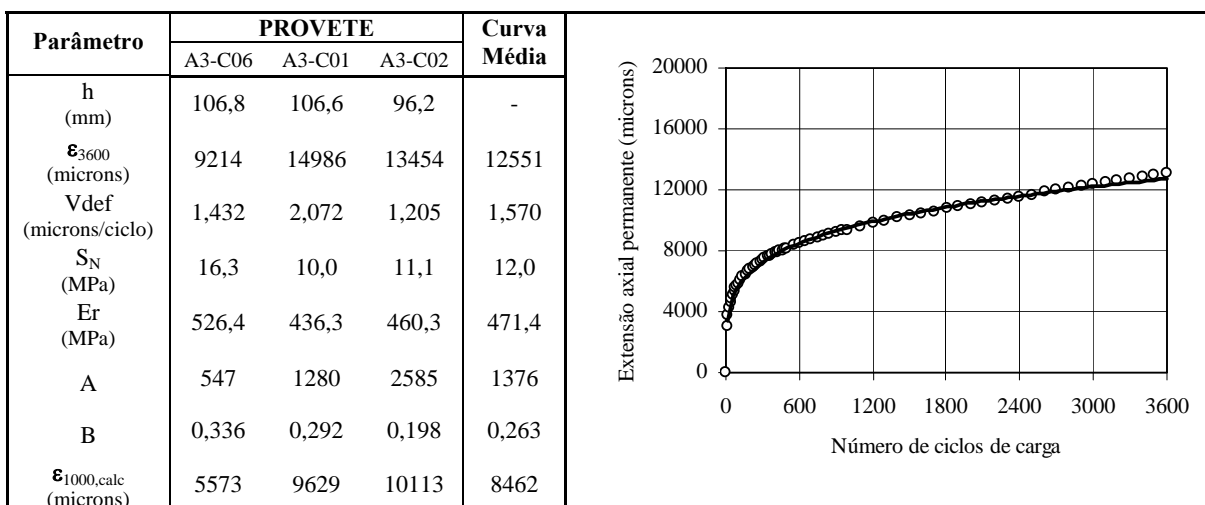


Figura I.27 – Curvas de deformação axial permanente (mistura A3) e respectivos parâmetros

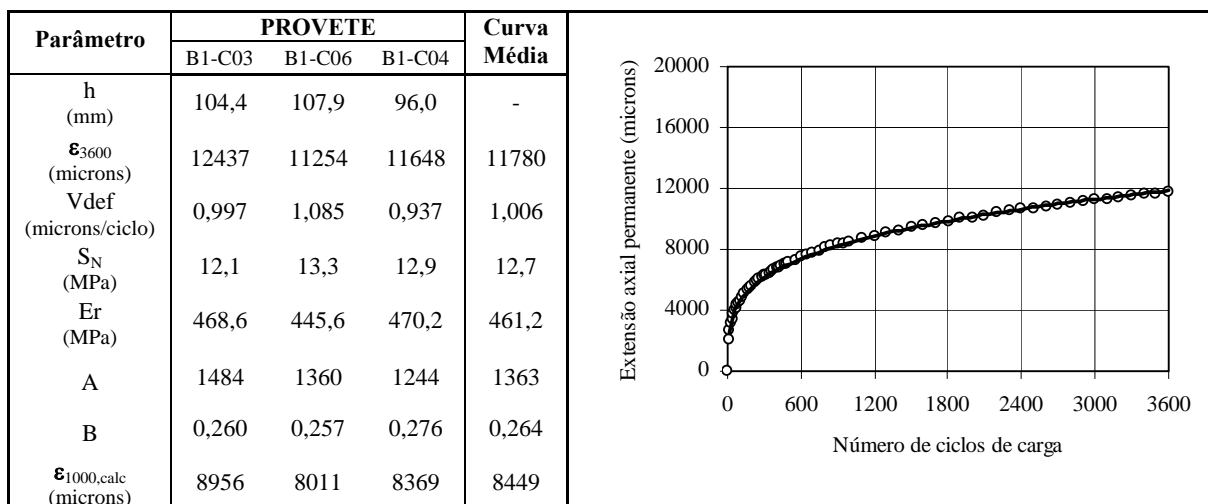


Figura I.28 – Curvas de deformação axial permanente (mistura B1) e respectivos parâmetros

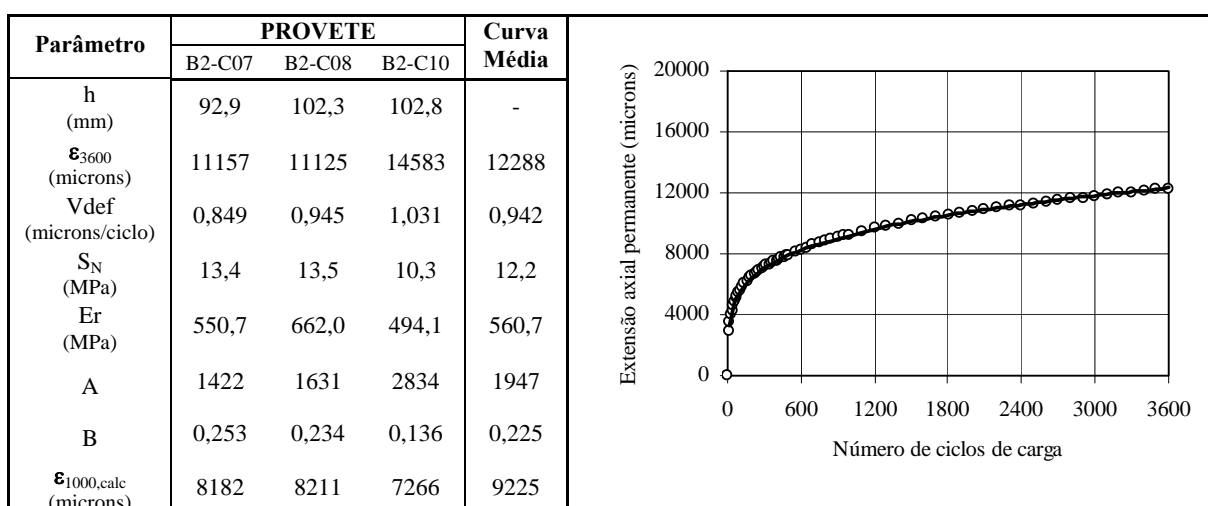


Figura I.29 – Curvas de deformação axial permanente (mistura B2) e respectivos parâmetros

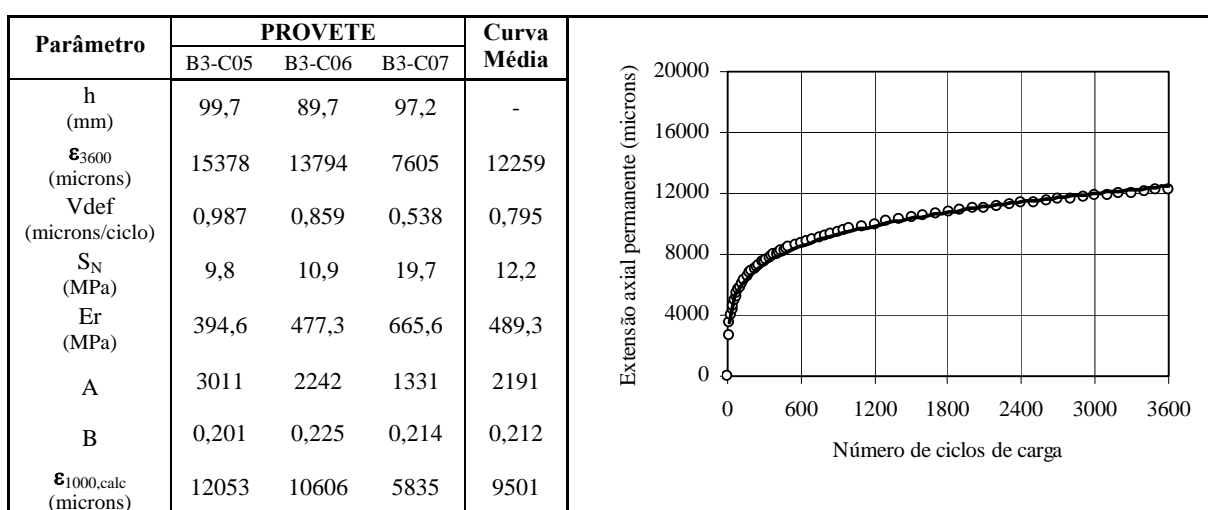


Figura I.30 – Curvas de deformação axial permanente (mistura B3) e respectivos parâmetros

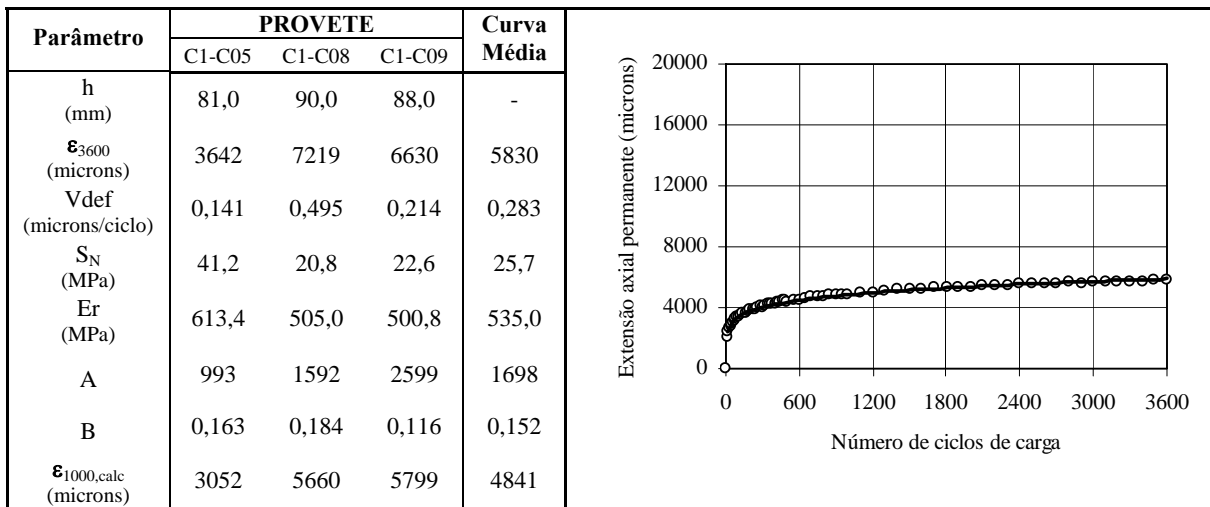


Figura I.31 – Curvas de deformação axial permanente (mistura C1) e respectivos parâmetros

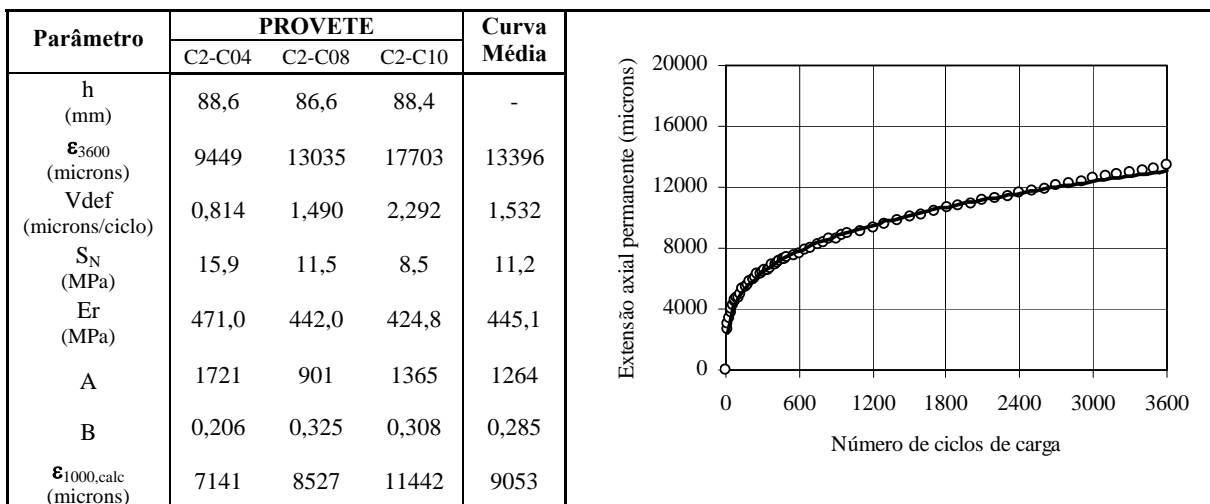


Figura I.32 – Curvas de deformação axial permanente (mistura C2) e respectivos parâmetros

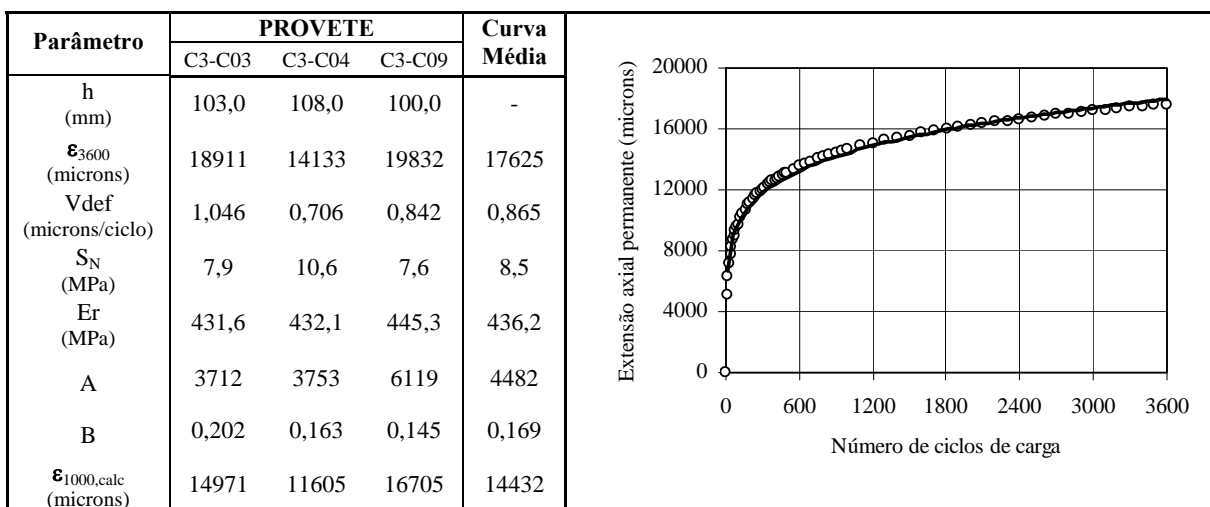


Figura I.33 – Curvas de deformação axial permanente (mistura C3) e respectivos parâmetros

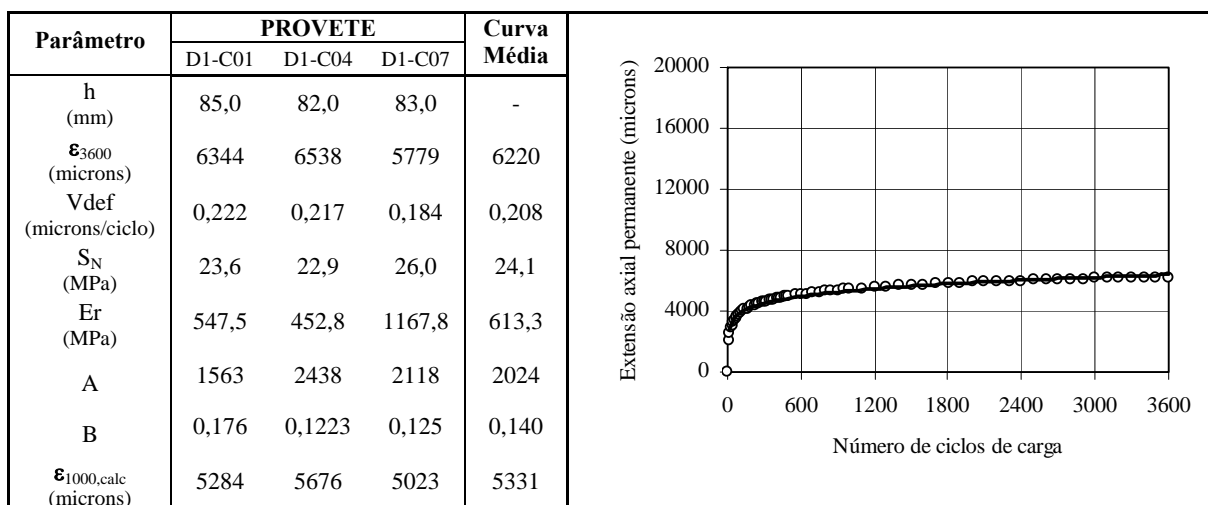


Figura I.34 – Curvas de deformação axial permanente (mistura D1) e respectivos parâmetros

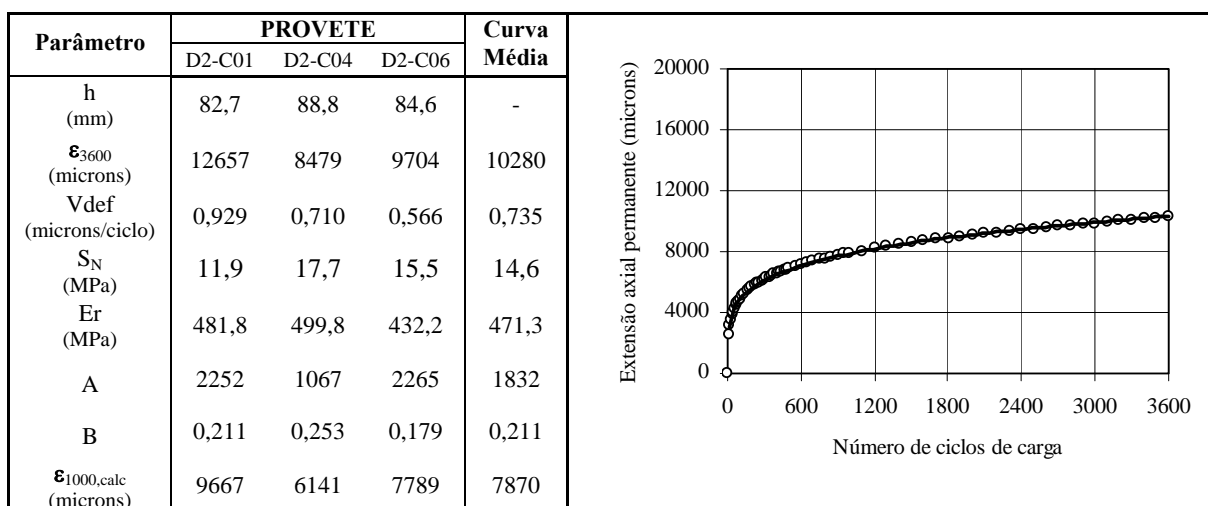


Figura I.35 – Curvas de deformação axial permanente (mistura D2) e respectivos parâmetros

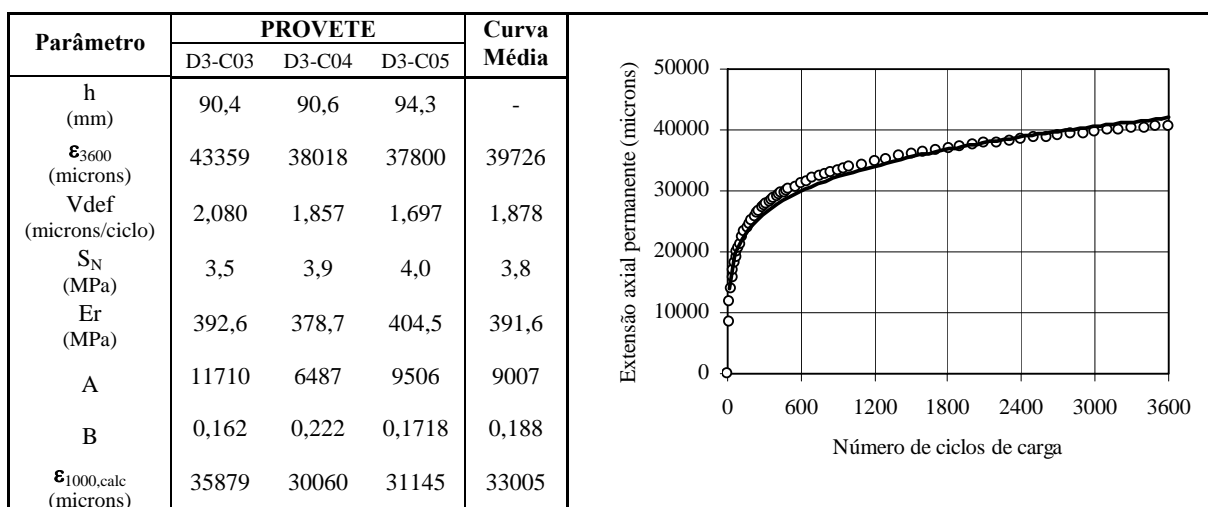


Figura I.36 – Curvas de deformação axial permanente (mistura D3) e respectivos parâmetros

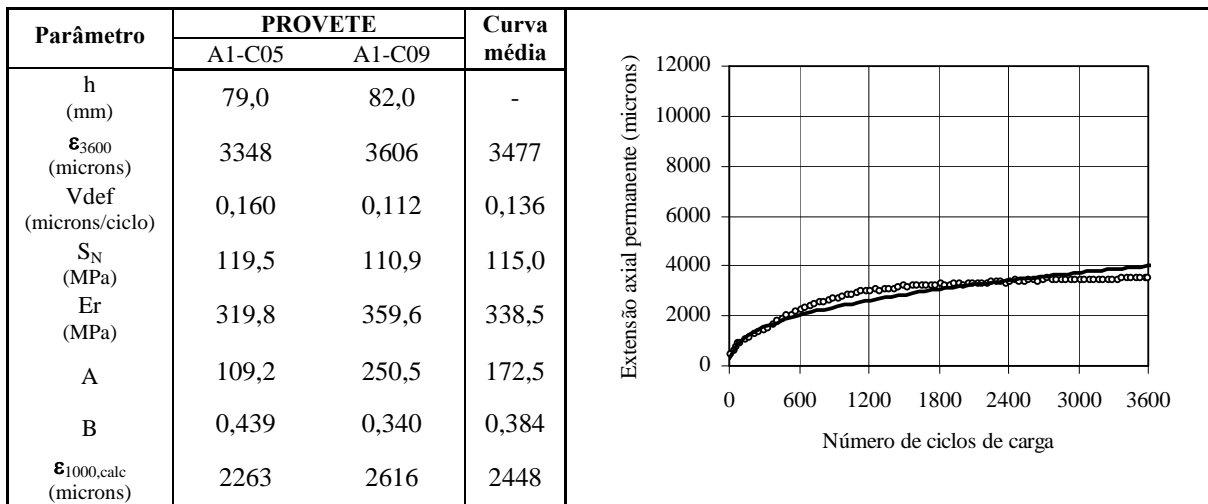


Figura I.37 – Parâmetros e curvas de deformação permanente em ensaio triaxial (mistura A1)

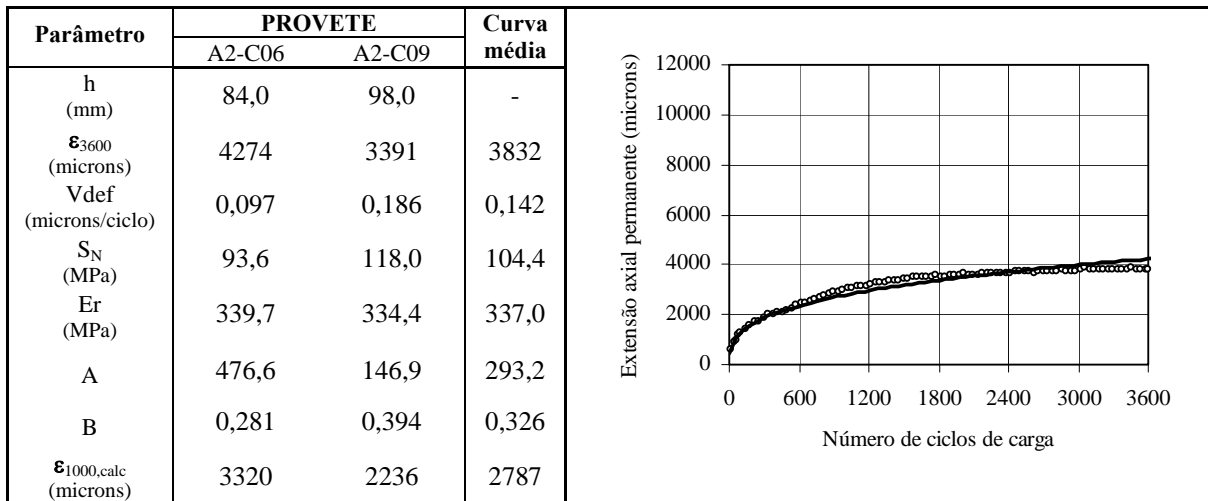


Figura I.38 – Parâmetros e curvas de deformação permanente em ensaio triaxial (mistura A2)

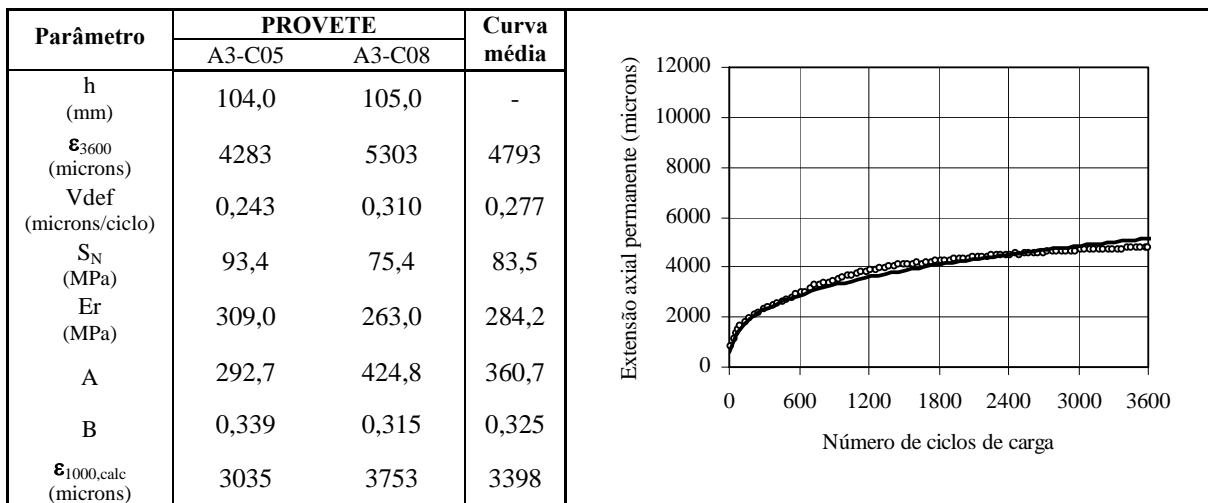


Figura I.39 – Parâmetros e curvas de deformação permanente em ensaio triaxial (mistura A3)

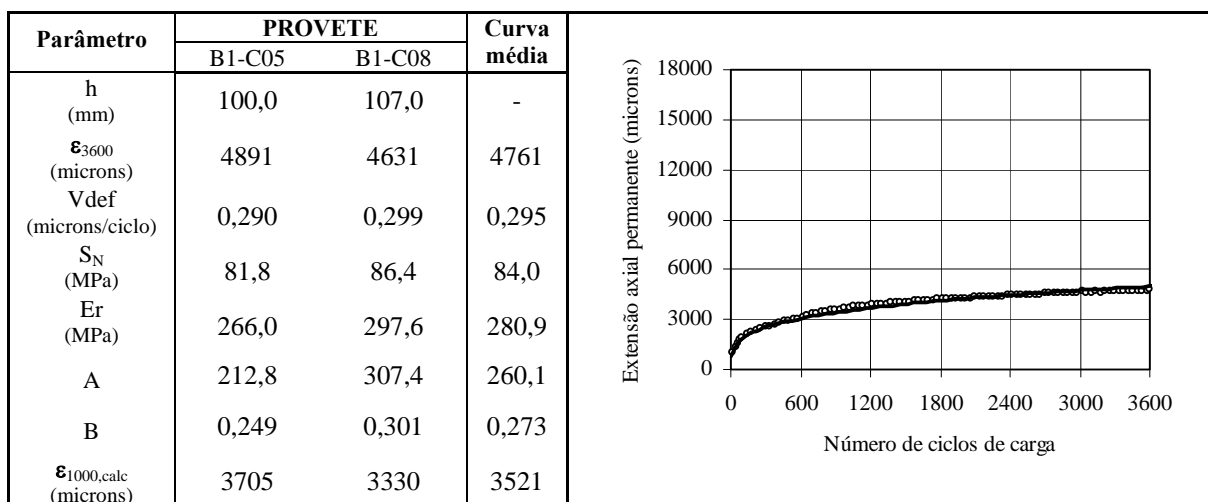


Figura I.40 – Parâmetros e curvas de deformação permanente em ensaio triaxial (mistura B1)

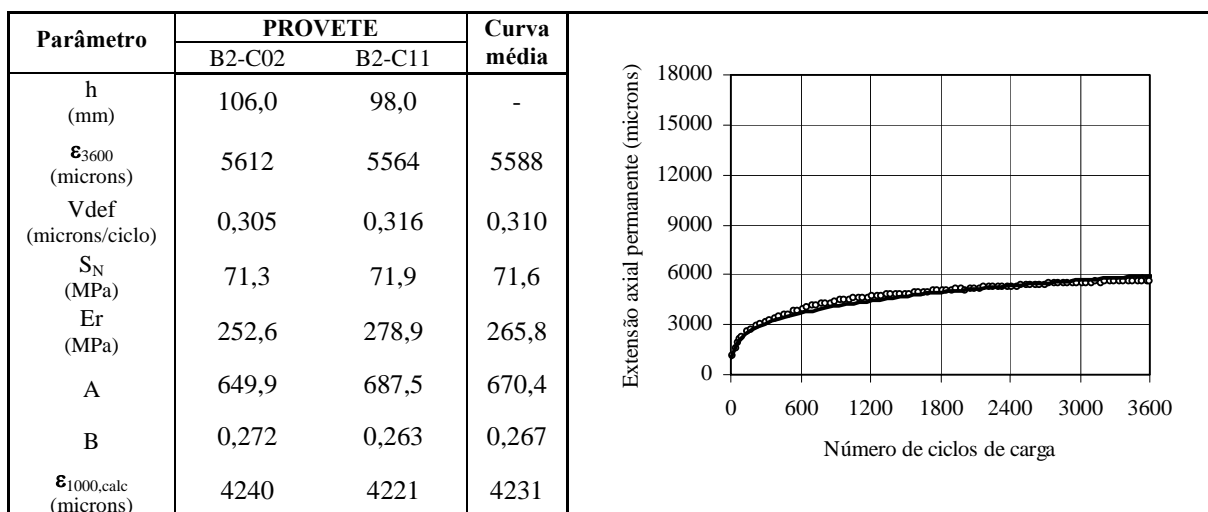


Figura I.41 – Parâmetros e curvas de deformação permanente em ensaio triaxial (mistura B2)

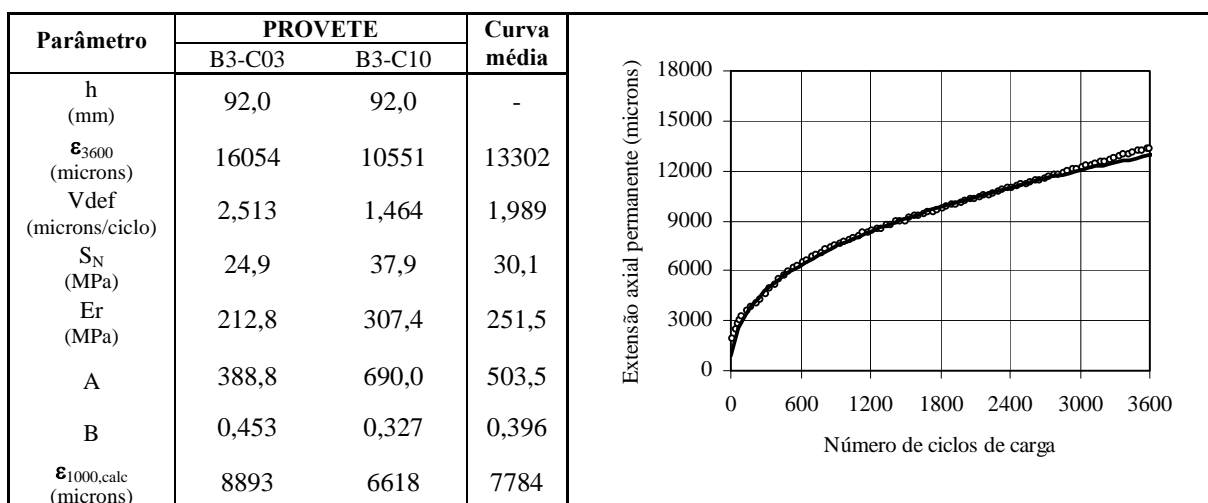


Figura I.42 – Parâmetros e curvas de deformação permanente em ensaio triaxial (mistura B3)

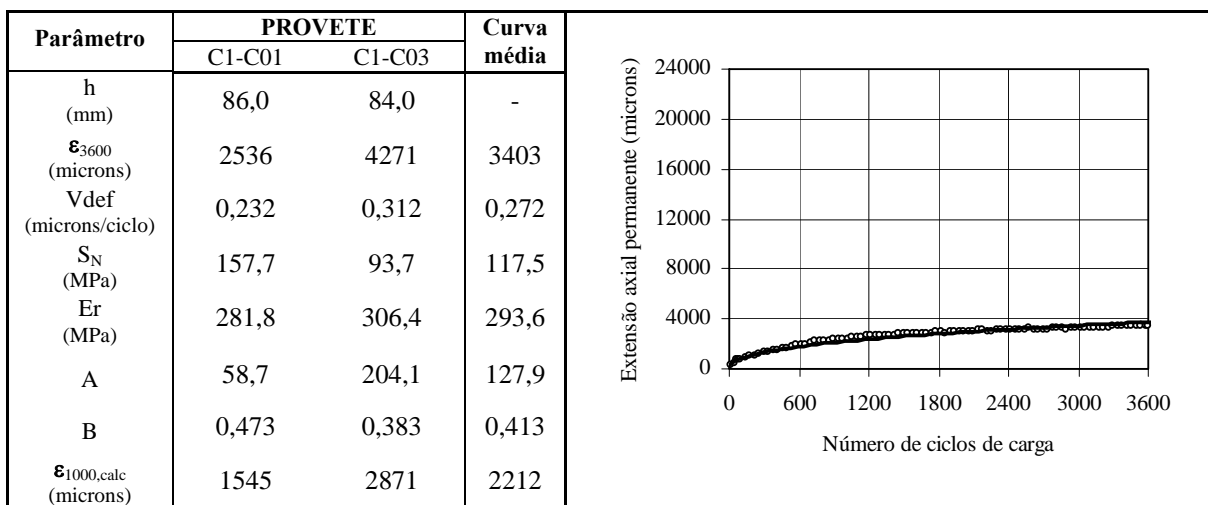


Figura I.43 – Parâmetros e curvas de deformação permanente em ensaio triaxial (mistura C1)

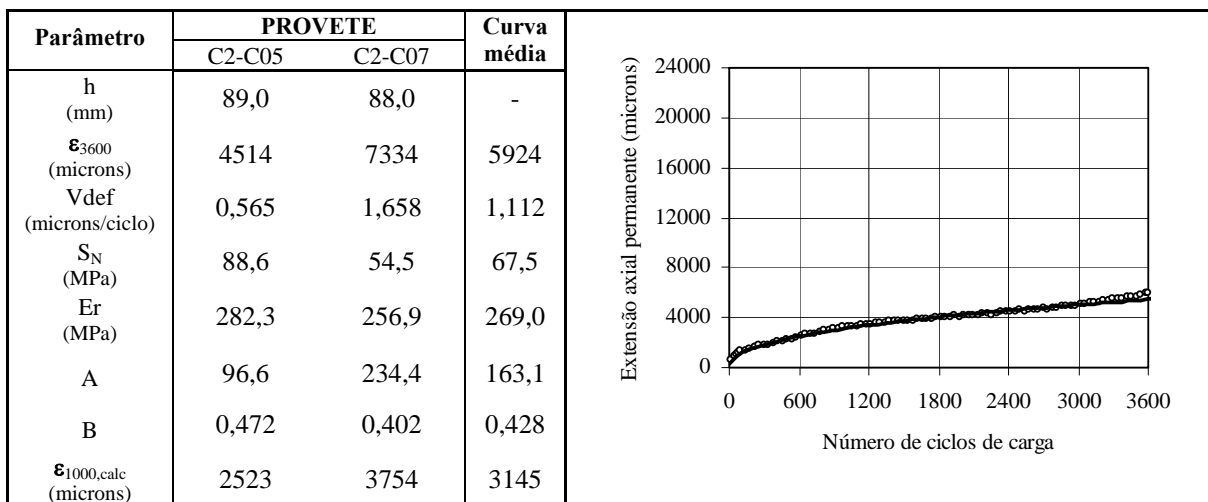


Figura I.44 – Parâmetros e curvas de deformação permanente em ensaio triaxial (mistura C2)

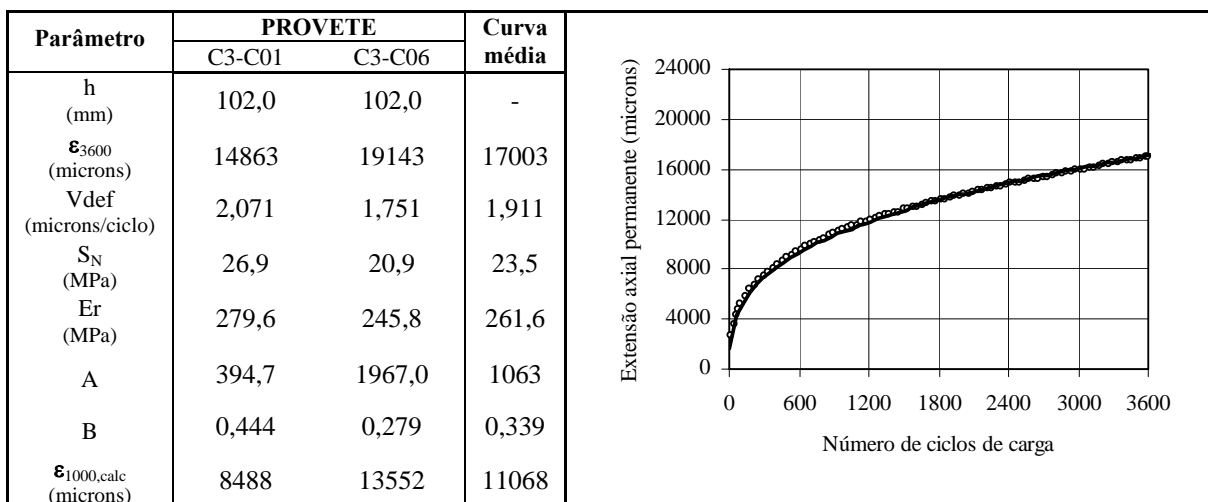


Figura I.45 – Parâmetros e curvas de deformação permanente em ensaio triaxial (mistura C3)

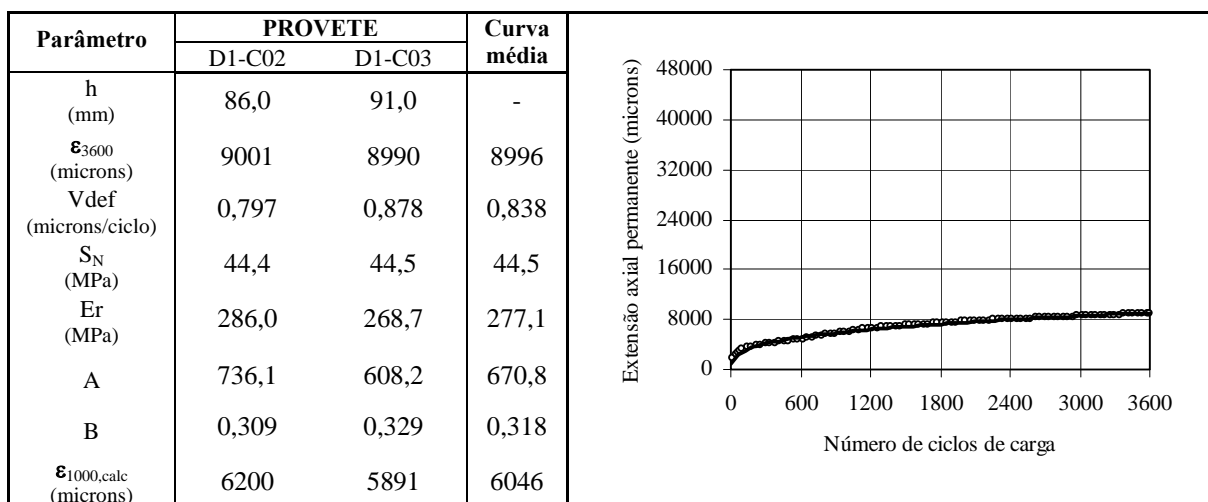


Figura I.46 – Parâmetros e curvas de deformação permanente em ensaio triaxial (mistura D1)

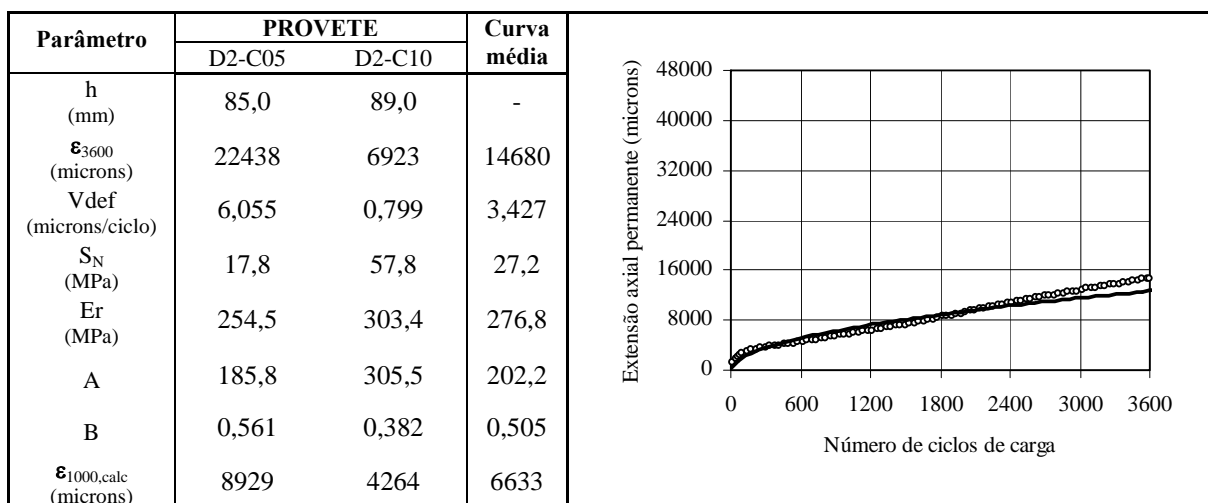


Figura I.47 – Parâmetros e curvas de deformação permanente em ensaio triaxial (mistura D2)

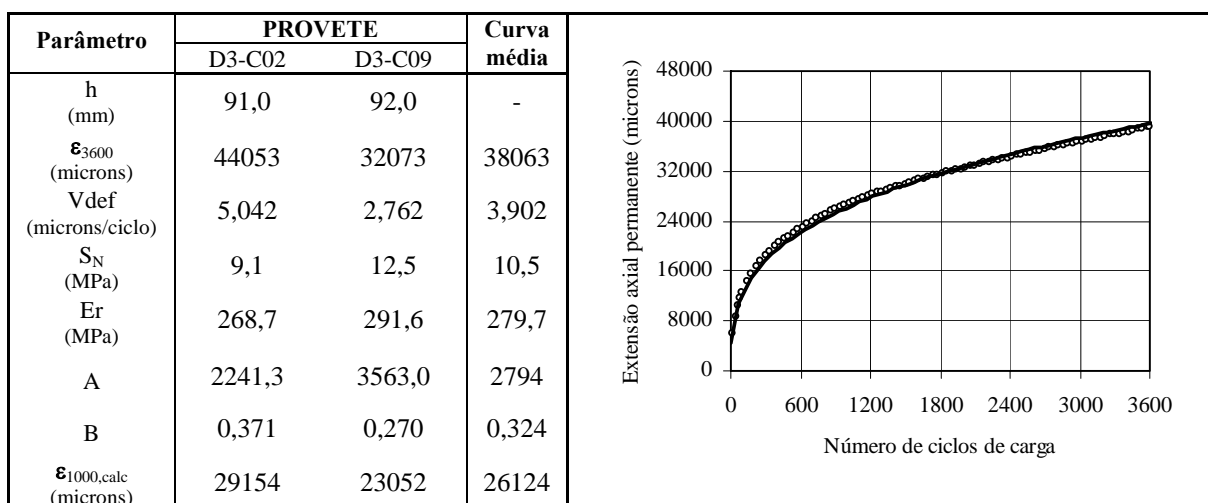


Figura I.48 – Parâmetros e curvas de deformação permanente em ensaio triaxial (mistura D3)

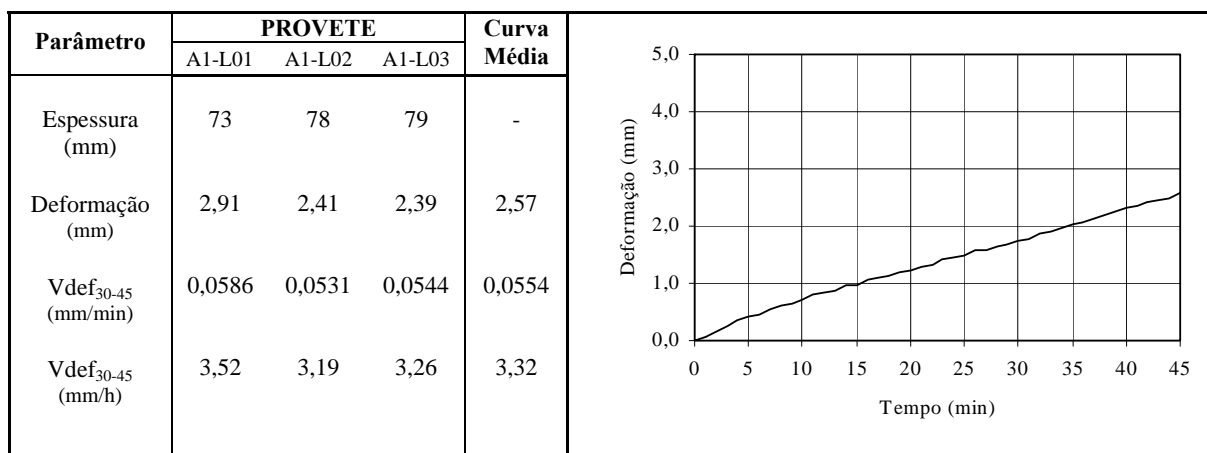


Figura I.49 – Curva de deformação permanente em simulador de tráfego (mistura A1)

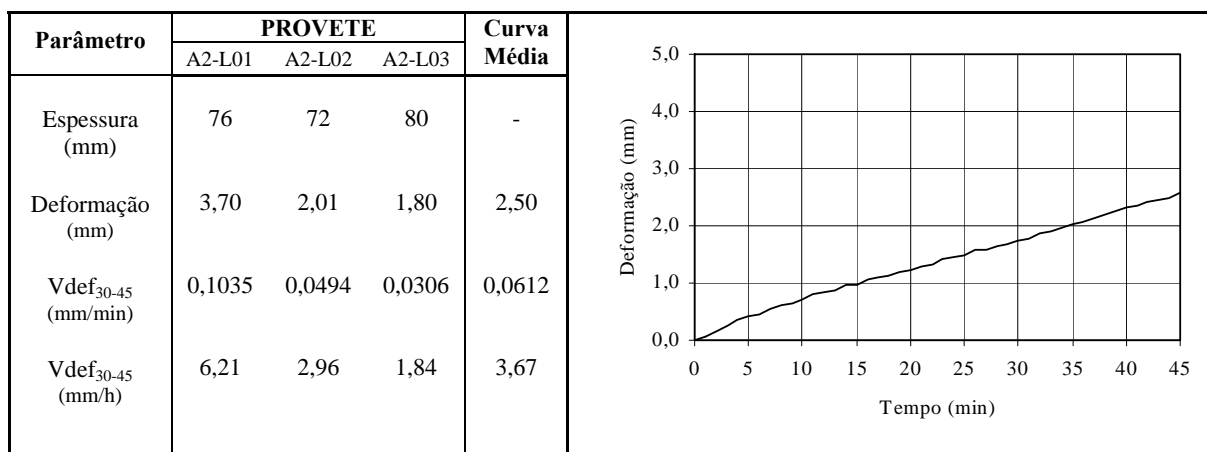


Figura I.50 – Curva de deformação permanente em simulador de tráfego (mistura A2)

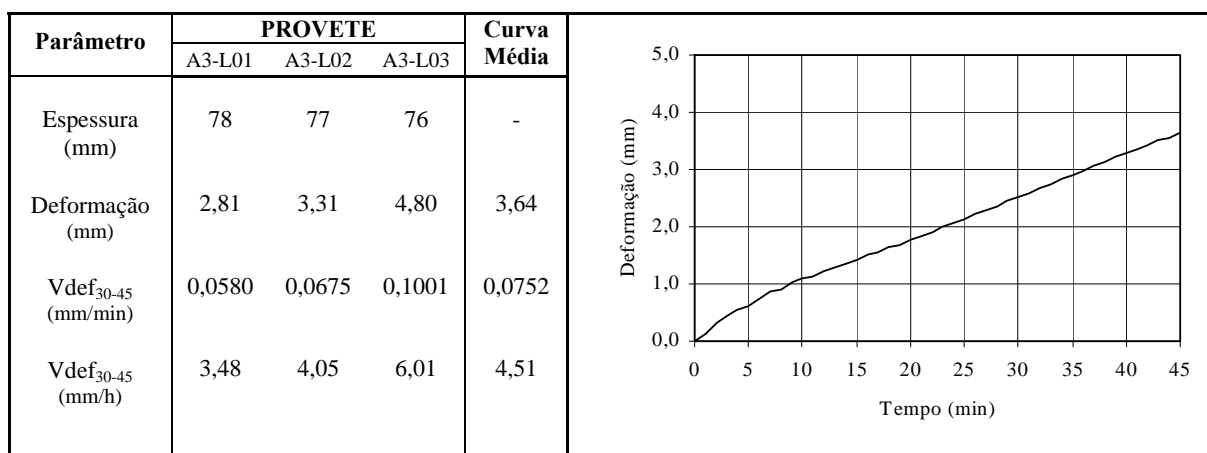


Figura I.51 – Curva de deformação permanente em simulador de tráfego (mistura A3)

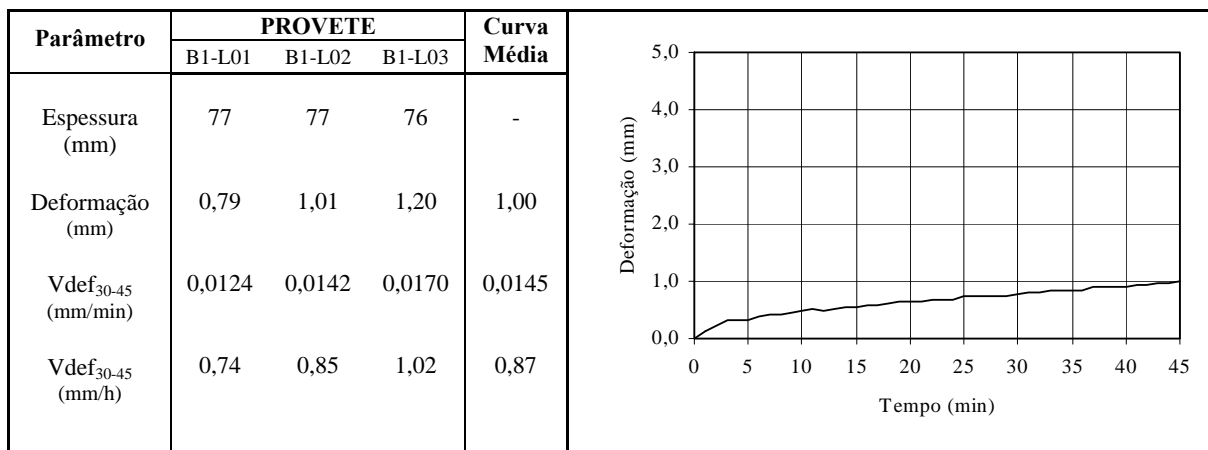


Figura I.52 – Curva de deformação permanente em simulador de tráfego (mistura B1)

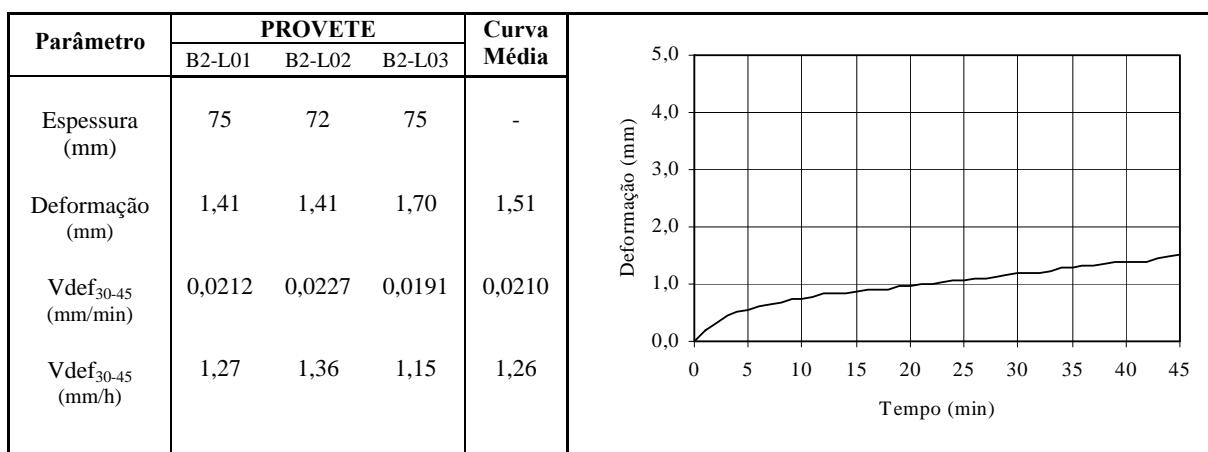


Figura I.53 – Curva de deformação permanente em simulador de tráfego (mistura B2)

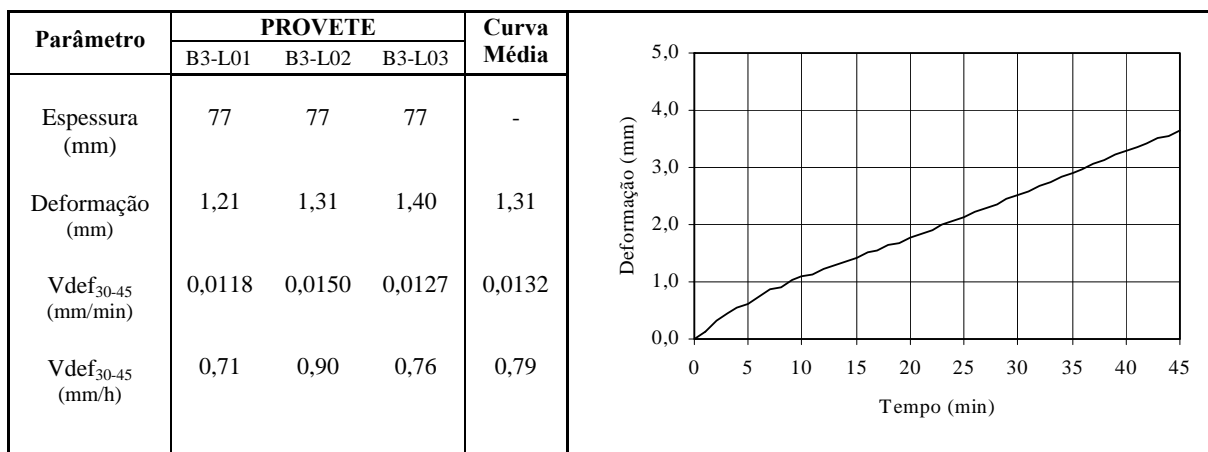


Figura I.54 – Curva de deformação permanente em simulador de tráfego (mistura B3)

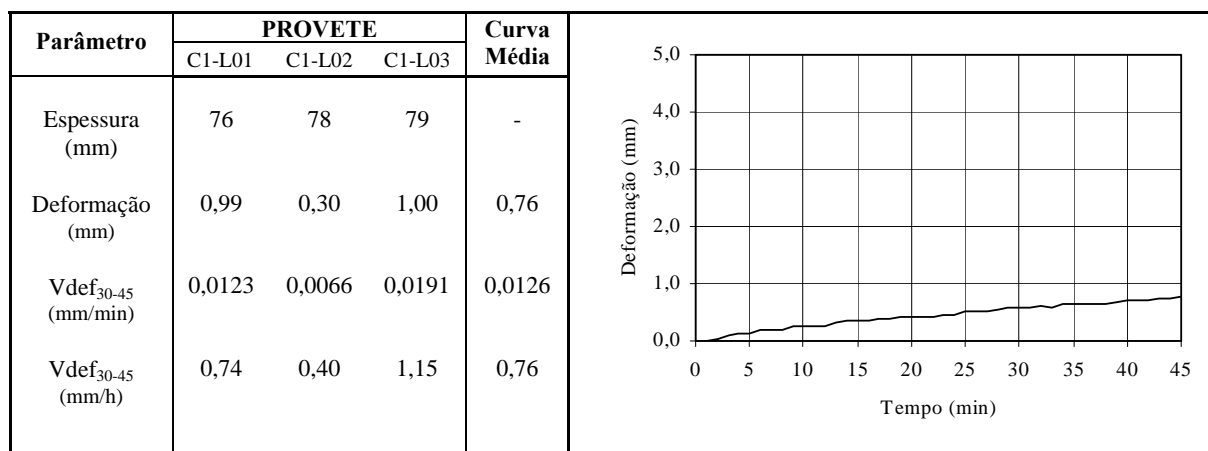


Figura I.55 – Curva de deformação permanente em simulador de tráfego (mistura C1)

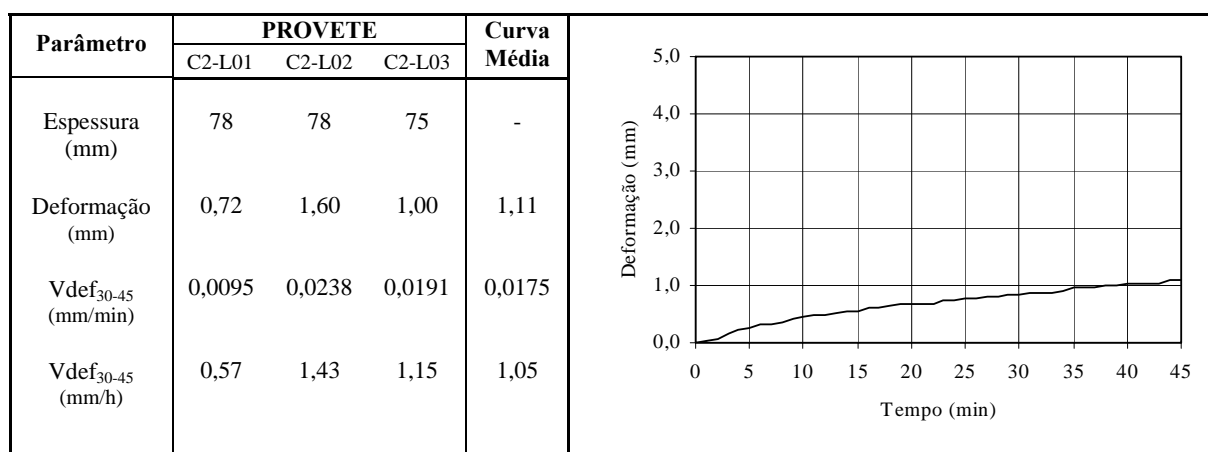


Figura I.56 – Curva de deformação permanente em simulador de tráfego (mistura C2)

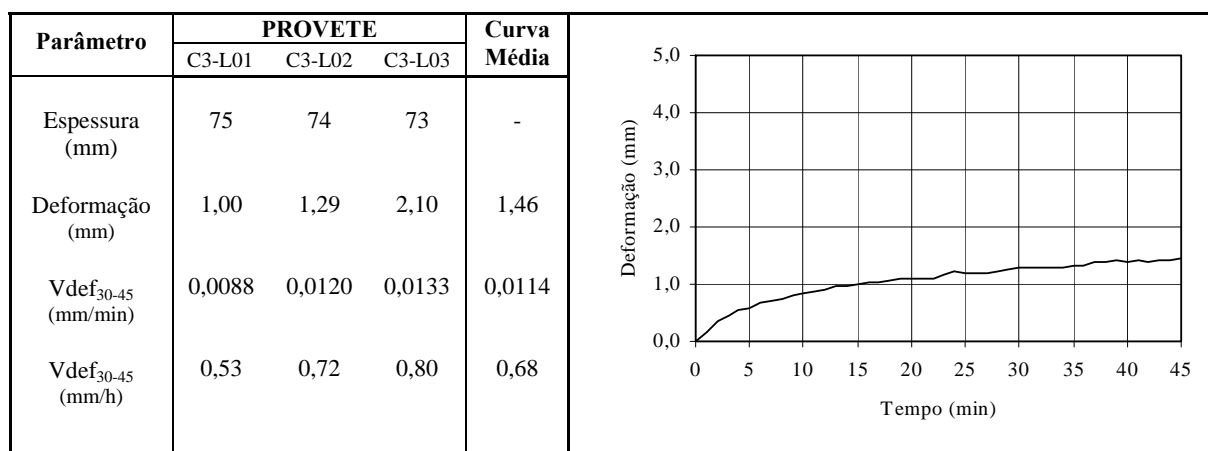


Figura I.57 – Curva de deformação permanente em simulador de tráfego (mistura C3)

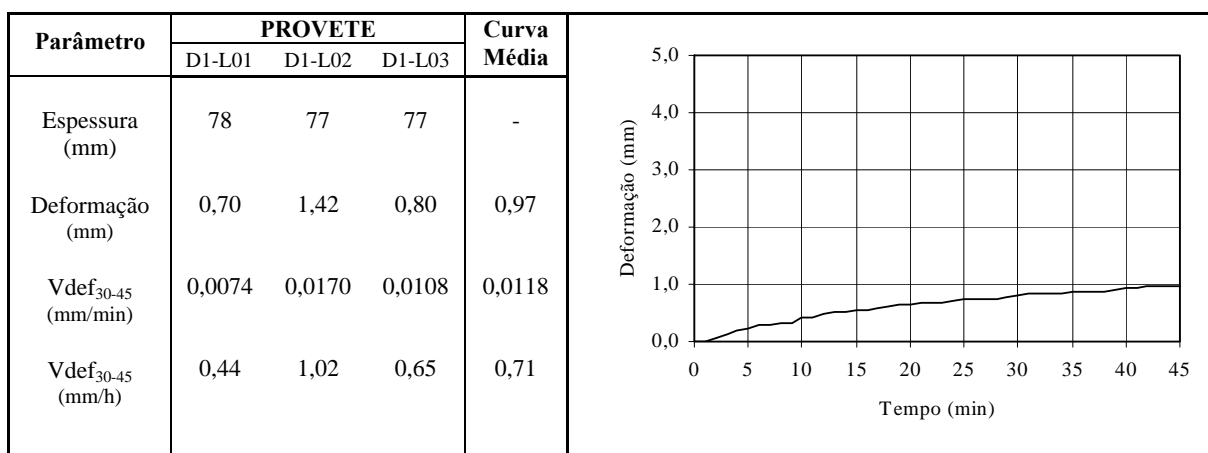


Figura I.58 – Curva de deformação permanente em simulador de tráfego (mistura D1)

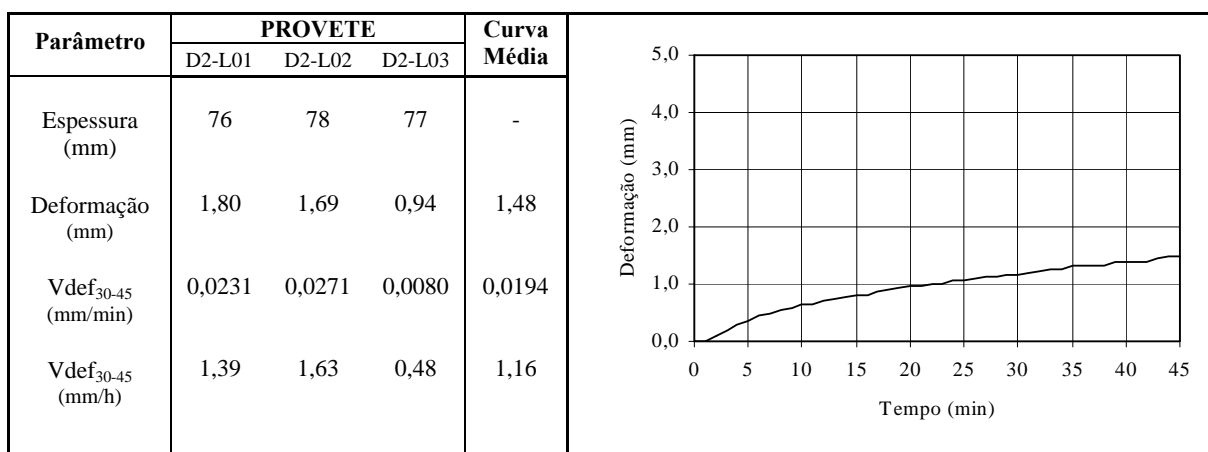


Figura I.59 – Curva de deformação permanente em simulador de tráfego (mistura D2)

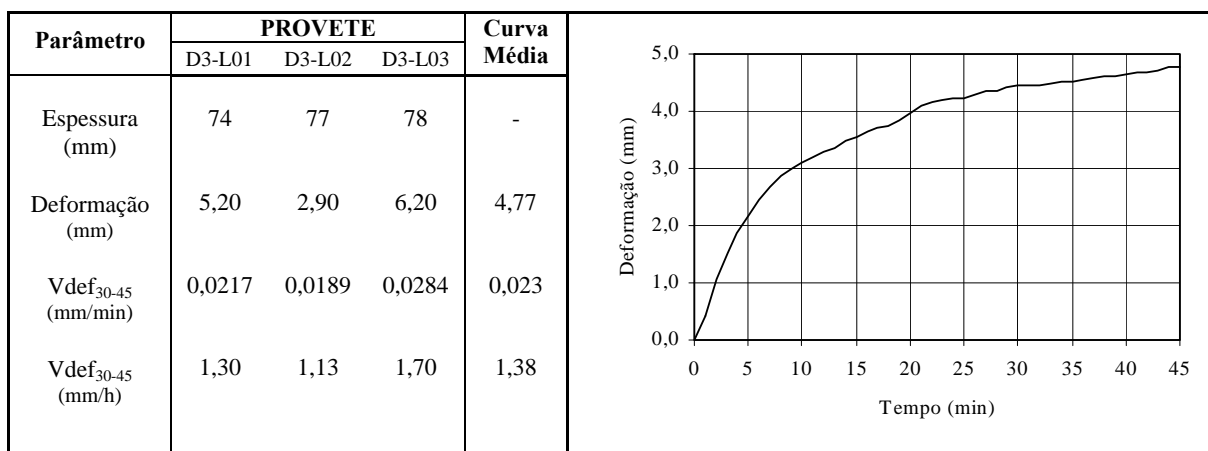


Figura I.60 – Curva de deformação permanente em simulador de tráfego (mistura D3)

Quadro I.46 – Resumo dos resultados obtidos nos ensaios de compressão uniaxial cíclicos com as misturas de macadame betuminoso aplicadas nos trechos experimentais

Mistura	ϵ_{3600} (microns)	Vdef (microns/ciclo)	S_N (MPa)	E_r (MPa)	A	B	$\epsilon_{1000,calc}$ (microns)
A1	10963	0,876	13,7	431,0	1720	0,226	8187
A2	13034	1,182	11,5	466,7	1896	0,234	9538
A3	12551	1,570	12,0	471,4	1376	0,263	8462
B1	11780	1,006	12,7	461,2	1363	0,264	8449
B2	12288	0,942	12,2	560,7	1947	0,225	9225
B3	12259	0,795	12,2	489,3	2191	0,212	9501
C1	5830	0,283	25,7	535,0	1698	0,152	4841
C2	13396	1,532	11,2	445,1	1264	0,285	9053
C3	17625	0,865	8,5	436,2	4482	0,169	14432
D1	6220	0,208	24,1	613,3	2024	0,140	5331
D2	10280	0,735	14,6	471,3	1832	0,211	7870
D3	39726	1,878	3,8	391,6	9007	0,188	33005

Quadro I.47 – Resumo dos resultados obtidos nos ensaios de compressão triaxial cíclicos com as misturas de macadame betuminoso aplicadas nos trechos experimentais

Mistura	ϵ_{3600} (microns)	Vdef (microns/ciclo)	S_N (MPa)	E_r (MPa)	A	B	$\epsilon_{1000,calc}$ (microns)
A1	3477	0,136	115,0	338,5	172,5	0,384	2448
A2	3832	0,142	104,4	337,0	293,2	0,326	2787
A3	4793	0,277	83,5	284,2	360,7	0,325	3398
B1	4761	0,295	84,0	280,9	260,1	0,273	3521
B2	5588	0,310	71,6	265,8	670,4	0,267	4231
B3	13302	1,989	30,1	251,5	503,5	0,396	7784
C1	3403	0,272	117,5	293,6	127,9	0,413	2212
C2	5924	1,112	67,5	269,0	163,1	0,428	3145
C3	17003	1,911	23,5	261,6	1063	0,339	11068
D1	8996	0,838	44,5	277,1	670,8	0,318	6046
D2	14680	3,427	27,2	276,8	202,2	0,505	6633
D3	38063	3,902	10,5	279,7	2794	0,324	26124

Quadro I.48 – Resumo dos resultados obtidos nos ensaios com simulador de tráfego com as misturas de macadame betuminoso aplicadas nos trechos experimentais

Mistura	Deformação (mm)	Vdef (mm/min)	Vdef (mm/h)
A1	2,57	0,0554	3,32
A2	2,50	0,0612	3,67
A3	3,64	0,0752	4,51
B1	1,00	0,0145	0,87
B2	1,51	0,0210	1,26
B3	1,31	0,0132	0,79
C1	0,76	0,0126	0,76
C2	1,11	0,0175	1,05
C3	1,46	0,0114	0,68
D1	0,97	0,0118	0,71
D2	1,48	0,0194	1,16
D3	4,77	0,0230	1,38

ANEXO II – RESULTADOS DOS ENSAIOS SOBRE PROVETES DE MACADAME BETUMINOSO PRODUZIDOS EM LABORATÓRIO

II.1 Designação das Misturas

Neste anexo apresentam-se os resultados experimentais dos ensaios de desempenho realizados sobre os provetes das oito misturas de macadame betuminoso produzidas e compactadas em laboratório (Quadro II.1).

Quadro II.1 – Misturas de macadame betuminoso produzidas e compactadas em laboratório

Número da Mistura	Designação da Mistura	Tipo de Mistura	TR (%)	Betume Novo	pb _R (%)	pb _N (%)
13	LA	MB	0	35/50	4,2	4,2
14	LB	MB _R	20	35/50	4,2	3,4
15	LC	MB _R	30	35/50	4,2	3,0
16	LD	MB _R	40	35/50	4,2	2,6
17	LE	MB _R	30	50/70	4,2	3,0
18	LF	MB _R	40	50/70	4,2	2,6
19	LG	MB _R	30	70/100	4,2	3,0
20	LH	MB _R	40	70/100	4,2	2,6

II.2 Características Gerais das Misturas

Antes dos resultados dos ensaios de desempenho, apresentam-se as características gerais dos provetes ensaiados. Nos Quadros II.2, II.3, II.4, II.5, II.6, II.7, II.8 e II.9, indicam-se as propriedades de todas as vigas de 8 × 8 × 40 cm³ disponíveis para serem usadas nos ensaios de flexão de cargas repetidas.

Nos Quadros II.10, II.11, II.12 e II.13 podem observar-se as características dos provetes cilíndricos de 150 mm de diâmetro, usados nos ensaios de compressão uniaxial cíclicos.

Quadro II.2 – Características gerais das vigas de macadame betuminoso, compactadas em laboratório, usadas nos ensaios de flexão de cargas repetidas (Mistura LA)

PROVETE	Bm (g/cm ³)	Bt (g/cm ³)	n (%)	TVB (%)	VMA (%)	Sb (%)
LA-V01	2,395	2,496	4,1	9,8	13,8	70,7
LA-V02	2,413	2,496	3,3	9,8	13,2	74,7
LA-V03	2,419	2,496	3,1	9,9	13,0	76,1
LA-V04	2,415	2,496	3,3	9,8	13,1	75,1
LA-V05	2,432	2,496	2,5	9,9	12,5	79,6
LA-V06	2,412	2,496	3,4	9,8	13,2	74,4
LA-V07	2,425	2,496	2,9	9,9	12,8	77,5
LA-V08	2,426	2,496	2,8	9,9	12,7	78,0
LA-V09	2,420	2,496	3,1	9,9	12,9	76,3
LA-V10	2,432	2,496	2,5	9,9	12,5	79,6
LA-V11	2,435	2,496	2,4	9,9	12,4	80,4
LA-V12	2,423	2,496	2,9	9,9	12,8	77,0
LA-Vmed	2,420	2,496	3,0	9,9	12,9	76,6

Quadro II.3 – Características gerais das vigas de macadame betuminoso, compactadas em laboratório, usadas nos ensaios de flexão de cargas repetidas (Mistura LB)

PROVETE	Bm (g/cm ³)	Bt (g/cm ³)	n (%)	TVB (%)	VMA (%)	Sb (%)
LB-V01	2,447	2,502	2,2	10,0	12,2	82,0
LB-V02	2,438	2,502	2,5	9,9	12,5	79,6
LB-V03	2,448	2,502	2,1	10,0	12,1	82,3
LB-V04	2,441	2,502	2,4	10,0	12,4	80,4
LB-V05	2,423	2,502	3,2	9,9	13,1	75,7
LB-V06	2,426	2,502	3,1	9,9	12,9	76,4
LB-V07	2,432	2,502	2,8	9,9	12,7	78,1
LB-V08	2,435	2,502	2,7	9,9	12,6	78,9
LB-V09	2,437	2,502	2,6	9,9	12,5	79,4
LB-V10	2,442	2,502	2,4	10,0	12,3	80,7
LB-V11	2,438	2,502	2,5	9,9	12,5	79,6
LB-V12	2,426	2,502	3,0	9,9	12,9	76,6
LB-Vmed	2,436	2,502	2,6	9,9	12,6	79,1

Quadro II.4 – Características gerais das vigas de macadame betuminoso, compactadas em laboratório, usadas nos ensaios de flexão de cargas repetidas (Mistura LC)

PROVETE	Bm (g/cm ³)	Bt (g/cm ³)	n (%)	TVB (%)	VMA (%)	Sb (%)
LC-V01	2,412	2,504	3,7	9,8	13,5	72,7
LC-V02	2,407	2,504	3,9	9,8	13,7	71,6
LC-V03	2,419	2,504	3,4	9,9	13,3	74,3
LC-V04	2,419	2,504	3,4	9,9	13,3	74,3
LC-V05	2,414	2,504	3,6	9,8	13,5	73,2
LC-V06	2,420	2,504	3,4	9,9	13,2	74,5
LC-V07	2,403	2,504	4,0	9,8	13,8	70,8
LC-V08	2,419	2,504	3,4	9,9	13,3	74,3
LC-V09	2,422	2,504	3,3	9,9	13,2	75,0
LC-V10	2,426	2,504	3,1	9,9	13,0	76,2
LC-V11	2,422	2,504	3,3	9,9	13,2	75,0
LC-V12	2,414	2,504	3,6	9,8	13,5	73,2
LC-Vmed	2,416	2,504	3,5	9,9	13,4	73,8

Quadro II.5 – Características gerais das vigas de macadame betuminoso, compactadas em laboratório, usadas nos ensaios de flexão de cargas repetidas (Mistura LD)

PROVETE	Bm (g/cm ³)	Bt (g/cm ³)	n (%)	TVB (%)	VMA (%)	Sb (%)
LD-V01	2,419	2,494	3,0	9,9	12,9	76,5
LD-V02	2,423	2,494	2,9	9,9	12,7	77,5
LD-V03	2,426	2,494	2,7	9,9	12,6	78,5
LD-V04	2,422	2,494	2,9	9,9	12,8	77,3
LD-V05	2,428	2,494	2,6	9,9	12,5	79,0
LD-V06	2,431	2,494	2,5	9,9	12,4	79,8
LD-V07	2,422	2,494	2,9	9,9	12,8	77,3
LD-V08	2,426	2,494	2,7	9,9	12,6	78,3
LD-V09	2,428	2,494	2,6	9,9	12,5	79,0
LD-V10	2,419	2,494	3,0	9,9	12,9	76,5
LD-V11	2,429	2,494	2,6	9,9	12,5	79,3
LD-V12	2,429	2,494	2,6	9,9	12,5	79,3
LD-Vmed	2,425	2,494	2,8	9,9	12,6	78,2

Quadro II.6 – Características gerais das vigas de macadame betuminoso, compactadas em laboratório, usadas nos ensaios de flexão de cargas repetidas (Mistura LE)

PROVETE	Bm (g/cm ³)	Bt (g/cm ³)	n (%)	TVB (%)	VMA (%)	Sb (%)
LE-V01	2,412	2,504	3,7	9,8	13,5	72,7
LE-V02	2,416	2,504	3,5	9,9	13,4	73,6
LE-V03	2,424	2,504	3,2	9,9	13,1	75,5
LE-V04	2,421	2,504	3,3	9,9	13,2	74,8
LE-V05	2,427	2,504	3,1	9,9	13,0	76,4
LE-V06	2,429	2,504	3,0	9,9	12,9	76,9
LE-V07	2,422	2,504	3,3	9,9	13,2	75,0
LE-V08	2,424	2,504	3,2	9,9	13,1	75,5
LE-V09	2,419	2,504	3,4	9,9	13,3	74,3
LE-V10	2,426	2,504	3,1	9,9	13,0	75,9
LE-V11	2,425	2,504	3,2	9,9	13,1	75,7
LE-V12	2,419	2,504	3,4	9,9	13,3	74,3
LE-Vmed	2,422	2,504	3,3	9,9	13,2	75,0

Quadro II.7 – Características gerais das vigas de macadame betuminoso, compactadas em laboratório, usadas nos ensaios de flexão de cargas repetidas (Mistura LF)

PROVETE	Bm (g/cm ³)	Bt (g/cm ³)	n (%)	TVB (%)	VMA (%)	Sb (%)
LF-V01	2,411	2,494	3,3	9,8	13,2	74,6
LF-V02	2,414	2,494	3,2	9,8	13,1	75,3
LF-V03	2,405	2,494	3,6	9,8	13,4	73,3
LF-V04	2,408	2,494	3,5	9,8	13,3	73,9
LF-V05	2,413	2,494	3,3	9,8	13,1	75,1
LF-V06	2,411	2,494	3,3	9,8	13,2	74,6
LF-V07	2,411	2,494	3,3	9,8	13,2	74,6
LF-V08	2,411	2,494	3,3	9,8	13,2	74,6
LF-V09	2,418	2,494	3,1	9,9	12,9	76,3
LF-V10	2,417	2,494	3,1	9,9	13,0	76,0
LF-V11	2,408	2,494	3,5	9,8	13,3	73,9
LF-V12	2,413	2,494	3,3	9,8	13,1	75,1
LF-Vmed	2,411	2,494	3,3	9,8	13,1	74,8

Quadro II.8 – Características gerais das vigas de macadame betuminoso, compactadas em laboratório, usadas nos ensaios de flexão de cargas repetidas (Mistura LG)

PROVETE	Bm (g/cm ³)	Bt (g/cm ³)	n (%)	TVB (%)	VMA (%)	Sb (%)
LG-V01	2,410	2,504	3,8	9,8	13,6	72,3
LG-V02	2,417	2,504	3,5	9,9	13,3	73,8
LG-V03	2,413	2,504	3,6	9,8	13,5	72,9
LG-V04	2,405	2,504	4,0	9,8	13,8	71,2
LG-V05	2,416	2,504	3,5	9,9	13,4	73,6
LG-V06	2,423	2,504	3,3	9,9	13,1	75,2
LG-V07	2,421	2,504	3,3	9,9	13,2	74,8
LG-V08	2,404	2,504	4,0	9,8	13,8	71,0
LG-V09	2,423	2,504	3,3	9,9	13,1	75,2
LG-V10	2,413	2,504	3,6	9,8	13,5	72,9
LG-V11	2,413	2,504	3,6	9,8	13,5	72,9
LG-V12	2,423	2,504	3,3	9,9	13,1	75,2
LG-Vmed	2,415	2,504	3,6	9,8	13,4	73,4

Quadro II.9 – Características gerais das vigas de macadame betuminoso, compactadas em laboratório, usadas nos ensaios de flexão de cargas repetidas (Mistura LH)

PROVETE	Bm (g/cm ³)	Bt (g/cm ³)	n (%)	TVB (%)	VMA (%)	Sb (%)
LH-V01	2,409	2,494	3,4	9,8	13,2	74,2
LH-V02	2,414	2,494	3,2	9,8	13,1	75,3
LH-V03	2,400	2,494	3,8	9,8	13,6	72,1
LH-V04	2,410	2,494	3,4	9,8	13,2	74,4
LH-V05	2,420	2,494	3,0	9,9	12,9	76,8
LH-V06	2,404	2,494	3,6	9,8	13,4	73,0
LH-V07	2,419	2,494	3,0	9,9	12,9	76,5
LH-V08	2,416	2,494	3,1	9,9	13,0	75,8
LH-V09	2,406	2,494	3,5	9,8	13,4	73,5
LH-V10	2,419	2,494	3,0	9,9	12,9	76,5
LH-V11	2,418	2,494	3,1	9,9	12,9	76,3
LH-V12	2,408	2,494	3,5	9,8	13,3	73,9
LH-Vmed	2,412	2,494	3,3	9,8	13,1	74,9

Quadro II.10 – Características gerais dos provetes cilíndricos de macadame betuminoso, compactados em laboratório e usados nos ensaios de compressão uniaxial (Misturas LA e LB)

PROVETE	Bm (g/cm ³)	Bt (g/cm ³)	n (%)	TVB (%)	VMA (%)	Sb (%)
LA-C01	2,432	2,496	2,6	9,9	12,5	79,5
LA-C02	2,430	2,496	2,7	9,9	12,6	78,8
LA-C03	2,425	2,496	2,8	9,9	12,7	77,8
LA-C04	2,419	2,496	3,1	9,9	12,9	76,2
LA-Cmed	2,427	2,496	2,8	9,9	12,7	78,1
LB-C01	2,432	2,502	2,8	9,9	12,7	77,9
LB-C02	2,434	2,502	2,7	9,9	12,7	78,4
LB-C03	2,428	2,502	3,0	9,9	12,9	76,9
LB-C04	2,431	2,502	2,8	9,9	12,7	77,9
LB-Cmed	2,431	2,502	2,8	9,9	12,7	77,8

Quadro II.11 – Características gerais dos projetos cilíndricos de macadame betuminoso, compactados em laboratório e usados nos ensaios de compressão uniaxial (Misturas LC e LD)

PROVETE	Bm (g/cm ³)	Bt (g/cm ³)	n (%)	TVB (%)	VMA (%)	Sb (%)
LC-C01	2,429	2,504	3,0	9,9	12,9	76,7
LC-C02	2,429	2,504	3,0	9,9	12,9	76,8
LC-C03	2,424	2,504	3,2	9,9	13,1	75,6
LC-C04	2,435	2,504	2,8	9,9	12,7	78,2
LC-Cmed	2,429	2,504	3,0	9,9	12,9	76,8
LD-C01	2,421	2,494	2,9	9,9	12,8	77,2
LD-C02	2,422	2,494	2,9	9,9	12,8	77,3
LD-C03	2,432	2,494	2,5	9,9	12,4	79,9
LD-C04	2,431	2,494	2,5	9,9	12,4	79,8
LD-Cmed	2,426	2,494	2,7	9,9	12,6	78,5

Quadro II.12 – Características gerais dos projetos cilíndricos de macadame betuminoso, compactados em laboratório e usados nos ensaios de compressão uniaxial (Misturas LE e LF)

PROVETE	Bm (g/cm ³)	Bt (g/cm ³)	n (%)	TVB (%)	VMA (%)	Sb (%)
LE-C01	2,409	2,504	3,8	9,8	13,6	72,2
LE-C02	2,424	2,504	3,2	9,9	13,1	75,6
LE-C03	2,416	2,504	3,5	9,9	13,4	73,7
LE-C04	2,426	2,504	3,1	9,9	13,0	76,0
LE-Cmed	2,419	2,504	3,4	9,9	13,3	74,4
LF-C01	2,411	2,494	3,3	9,8	13,2	74,6
LF-C02	2,413	2,494	3,3	9,8	13,1	75,1
LF-C03	2,426	2,494	2,7	9,9	12,6	78,5
LF-C04	2,389	2,494	4,2	9,7	13,9	69,9
LF-Cmed	2,410	2,494	3,4	9,8	13,2	74,5

Quadro II.13 – Características gerais dos projetos cilíndricos de macadame betuminoso, compactados em laboratório e usados nos ensaios de compressão uniaxial (Misturas LG e LH)

PROVETE	Bm (g/cm ³)	Bt (g/cm ³)	n (%)	TVB (%)	VMA (%)	Sb (%)
LG-C01	2,414	2,504	3,6	9,8	13,4	73,3
LG-C02	2,420	2,504	3,4	9,9	13,2	74,6
LG-C03	2,402	2,504	4,1	9,8	13,9	70,7
LG-C04	2,413	2,504	3,6	9,8	13,5	73,1
LG-Cmed	2,412	2,504	3,7	9,8	13,5	72,9
LH-C01	2,398	2,494	3,9	9,8	13,6	71,7
LH-C02	2,405	2,494	3,6	9,8	13,4	73,4
LH-C03	2,406	2,494	3,5	9,8	13,3	73,5
LH-C04	2,401	2,494	3,7	9,8	13,5	72,3
LH-Cmed	2,402	2,494	3,7	9,8	13,5	72,7

II.3 Módulos de Deformabilidade e Ângulos de Fase

A seguir apresenta-se um resumo dos resultados, em termos de módulos de deformabilidade e de ângulos de fase, para as oito misturas de macadame betuminoso produzidas em laboratório, obtidos nas seguintes condições:

- Frequências de 10 Hz, 5 Hz e 1 Hz;
- Temperaturas de 15°C, 25°C e 40°C;
- Extensão controlada de 100 microns.

Quadro II.14 – Módulos de deformabilidade e ângulos de fase da mistura LA

Provete	Temperatura (°C)	Módulo de Deformabilidade (MPa)			Ângulo de Fase (graus)		
		10 Hz	5 Hz	1 Hz	10 Hz	5 Hz	1 Hz
LA-V01	15	10915	9729	6587	15,3	16,5	18,6
LA-V06	15	10342	10208	7039	13,3	13,2	17,0
LA-V11	15	11258	11510	7588	14,5	15,4	18,1
Valor médio		10838	10482	7071	14,4	15,0	17,9
LA-V03	25	6582	5328	3216	26,7	29,7	32,6
LA-V05	25	7302	5862	3539	28,4	31,1	32,7
LA-V10	25	7187	5820	3447	28,3	31,9	33,8
Valor médio		7024	5670	3401	27,8	30,9	33,0
LA-V02	40	2206	1657	1007	40,3	41,0	33,7
LA-V07	40	2400	1747	1123	41,8	41,1	33,4
LA-V09	40	2336	1807	1105	39,8	39,2	31,2
Valor médio		2314	1737	1078	40,6	40,4	32,8

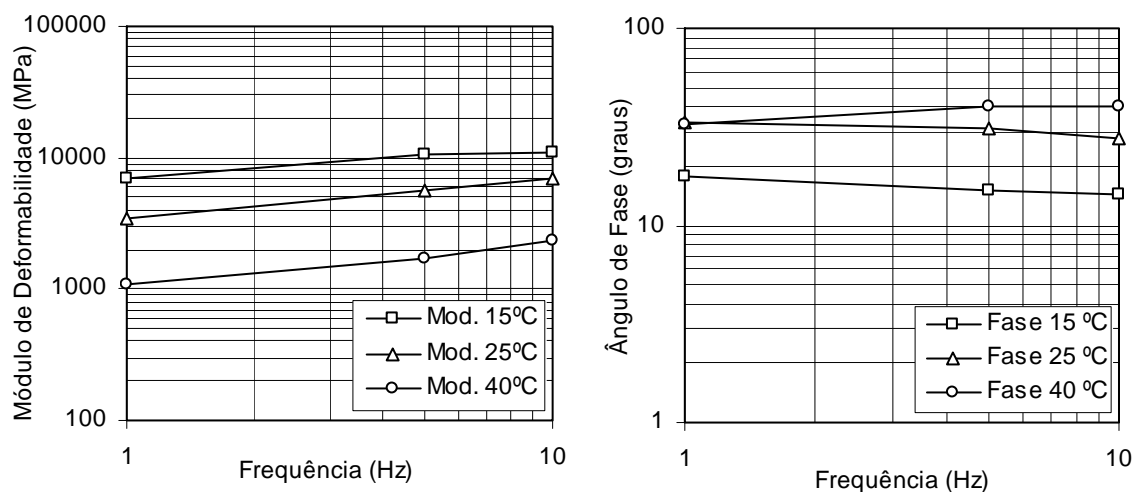


Figura II.1 – Variação do módulo de deformabilidade e do ângulo de fase da mistura LA

Quadro II.15 – Módulos de deformabilidade e ângulos de fase da mistura LB

Provete	Temperatura (°C)	Módulo de Deformabilidade (MPa)			Ângulo de Fase (graus)		
		10 Hz	5 Hz	1 Hz	10 Hz	5 Hz	1 Hz
LB-V01	15	12656	12057	8708	9,9	13,0	13,3
LB-V07	15	10454	10337	7490	10,2	10,9	10,5
LB-V10	15	10324	10436	7970	11,0	10,6	12,6
Valor médio		11145	10943	8056	10,4	11,5	12,1
LB-V03	25	8480	7694	5189	20,1	21,3	22,8
LB-V06	25	7891	7039	4700	19,3	21,8	22,1
LB-V09	25	8404	7569	5042	19,2	21,1	22,1
Valor médio		8258	7434	4977	19,5	21,4	22,3
LB-V02	40	3472	2649	1724	33,8	35,2	28,5
LB-V05	40	3524	2734	1812	32,8	33,1	28,2
LB-V11	40	3447	2668	1650	32,0	32,6	27,3
Valor médio		3481	2684	1729	32,9	33,6	28,0

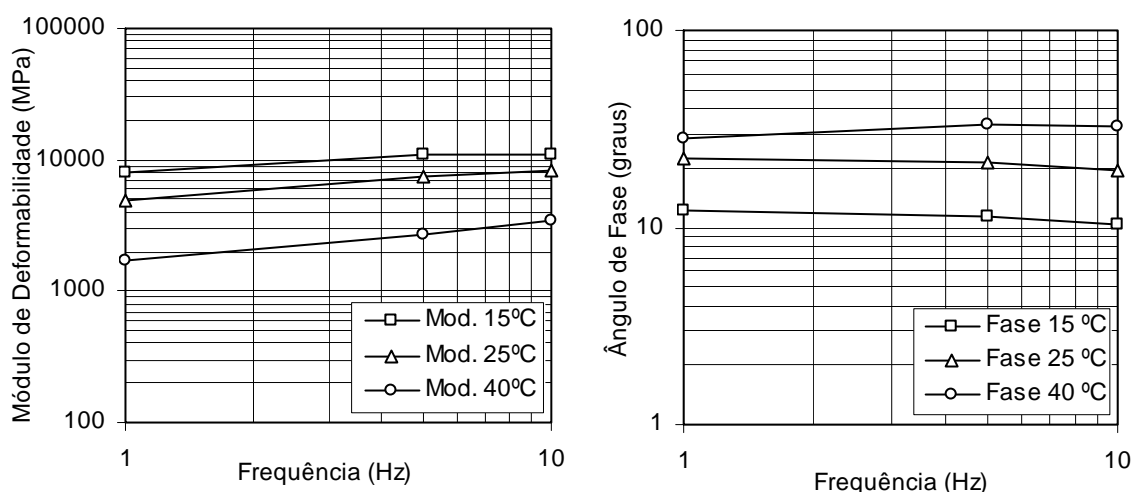


Figura II.2 – Variação do módulo de deformabilidade e do ângulo de fase da mistura LB

Quadro II.16 – Módulos de deformabilidade e ângulos de fase da mistura LC

Provete	Temperatura (°C)	Módulo de Deformabilidade (MPa)			Ângulo de Fase (graus)		
		10 Hz	5 Hz	1 Hz	10 Hz	5 Hz	1 Hz
LC-V01	15	10460	10761	8249	10,8	10,2	10,6
LC-V07	15	10918	10215	7815	8,8	9,0	9,6
LC-V10	15	12222	11553	9329	12,0	12,4	11,2
Valor médio		11200	10843	8464	10,5	10,5	10,5
LC-V03	25	9577	8592	5947	17,4	18,6	18,7
LC-V06	25	9291	8211	5931	17,8	19,4	21,6
LC-V09	25	9036	8251	5858	16,4	19,0	20,9
Valor médio		9301	8351	5912	17,2	19,0	20,4
LC-V02	40	4522	3584	2507	27,1	28,1	24,7
LC-V05	40	3786	2975	1933	32,6	33,6	30,5
LC-V11	40	3947	3183	2041	30,5	31,4	28,9
Valor médio		4085	3247	2160	30,1	31,0	28,0

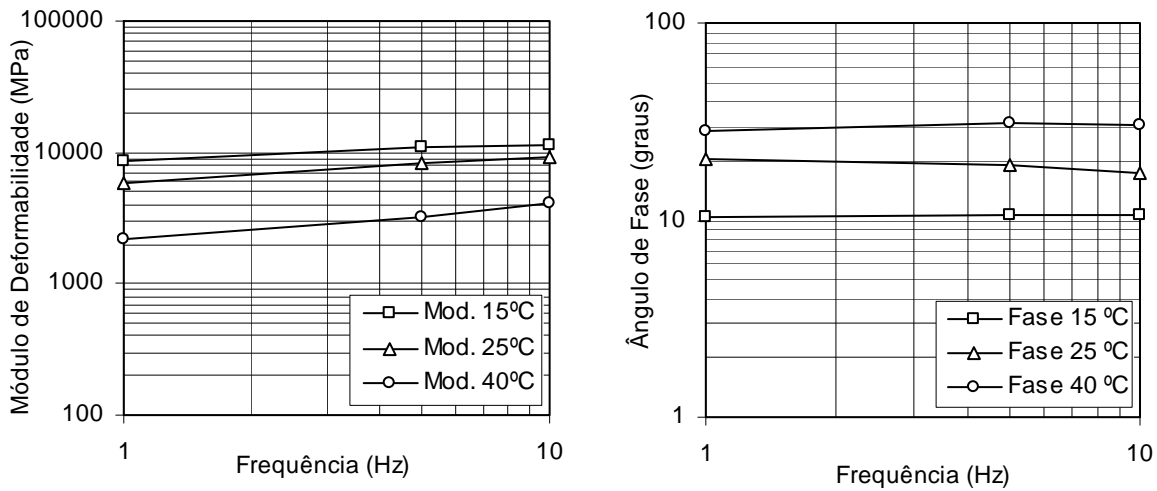


Figura II.3 – Variação do módulo de deformabilidade e do ângulo de fase da mistura LC

Quadro II.17 – Módulos de deformabilidade e ângulos de fase da mistura LD

Provete	Temperatura (°C)	Módulo de Deformabilidade (MPa)			Ângulo de Fase (graus)		
		10 Hz	5 Hz	1 Hz	10 Hz	5 Hz	1 Hz
LD-V01	15	10202	9906	7288	8,7	9,6	11,2
LD-V07	15	11537	10993	8861	9,5	9,3	9,9
LD-V10	15	11643	10572	8194	10,1	9,5	10,7
Valor médio		11127	10490	8114	9,4	9,5	10,6
LD-V03	25	8922	8358	5586	15,3	16,1	16,6
LD-V06	25	7612	7460	5332	14,3	17,0	17,9
LD-V09	25	9846	9299	6202	14,0	15,7	16,2
Valor médio		8793	8372	5707	14,5	16,3	16,9
LD-V02	40	4746	3812	2461	28,5	29,7	26,6
LD-V05	40	4283	3461	2345	29,6	31,5	28,6
LD-V11	40	4788	3804	2401	26,6	29,0	26,6
Valor médio		4606	3692	2402	28,2	30,1	27,3

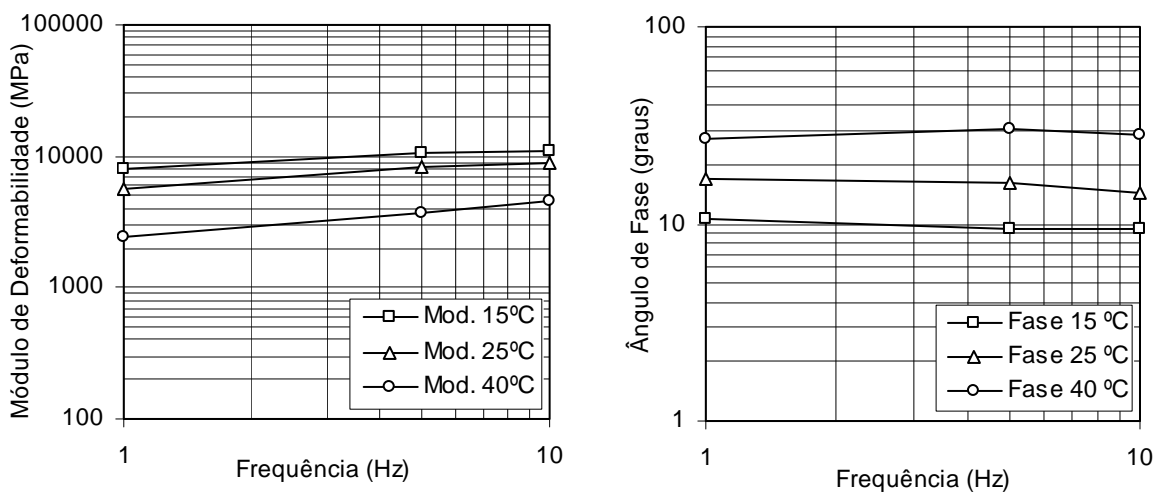


Figura II.4 – Variação do módulo de deformabilidade e do ângulo de fase da mistura LD

Quadro II.18 – Módulos de deformabilidade e ângulos de fase da mistura LE

Provete	Temperatura (°C)	Módulo de Deformabilidade (MPa)			Ângulo de Fase (graus)		
		10 Hz	5 Hz	1 Hz	10 Hz	5 Hz	1 Hz
LE-V01	15	10119	10432	7412	9,7	10,7	9,8
LE-V07	15	11274	10728	8165	12,1	11,0	12,8
LE-V10	15	12016	10765	8653	10,3	10,6	10,4
Valor médio		11136	10642	8077	10,7	10,8	11,0
LE-V03	25	7669	7714	5644	15,4	17,1	18,9
LE-V06	25	8214	7447	5172	18,2	19,4	19,8
LE-V09	25	7808	7307	5675	14,0	15,6	17,0
Valor médio		7897	7489	5497	15,9	17,4	18,6
LE-V02	40	4255	3362	1959	28,8	29,9	25,6
LE-V05	40	3659	2837	1709	30,1	31,2	28,6
LE-V11	40	4341	3467	2297	27,9	29,3	27,4
Valor médio		4085	3222	1988	28,9	30,1	27,2

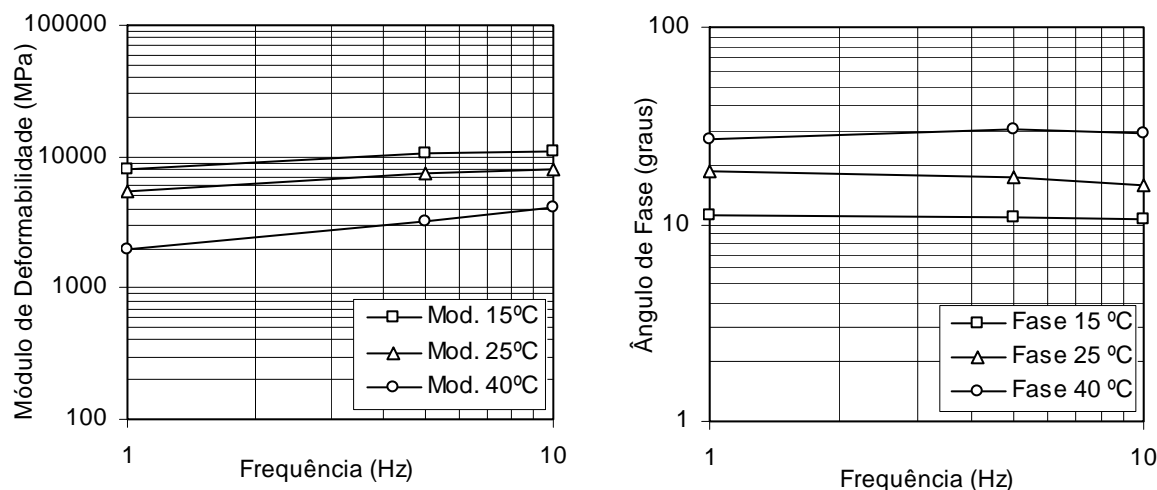


Figura II.5 – Variação do módulo de deformabilidade e do ângulo de fase da mistura LE

Quadro II.19 – Módulos de deformabilidade e ângulos de fase da mistura LF

Provete	Temperatura (°C)	Módulo de Deformabilidade (MPa)			Ângulo de Fase (graus)		
		10 Hz	5 Hz	1 Hz	10 Hz	5 Hz	1 Hz
LF-V01	15	9593	9427	6607	9,4	8,7	8,8
LF-V07	15	11524	11850	8974	11,8	9,0	8,9
LF-V10	15	8173	7790	6093	9,0	9,0	9,9
Valor médio		9763	9689	7225	10,1	8,9	9,2
LF-V03	25	8532	7505	5710	16,4	18,1	18,8
LF-V06	25	7639	7692	6142	12,0	13,0	13,2
LF-V09	25	7806	7522	5863	15,2	15,3	16,4
Valor médio		7992	7573	5905	14,5	15,5	16,1
LF-V02	40	4240	3457	2300	25,5	27,9	25,6
LF-V05	40	5133	4283	2794	22,4	24,6	22,6
LF-V11	40	4006	3386	2032	24,8	26,4	25,9
Valor médio		4460	3709	2375	24,2	26,3	24,7

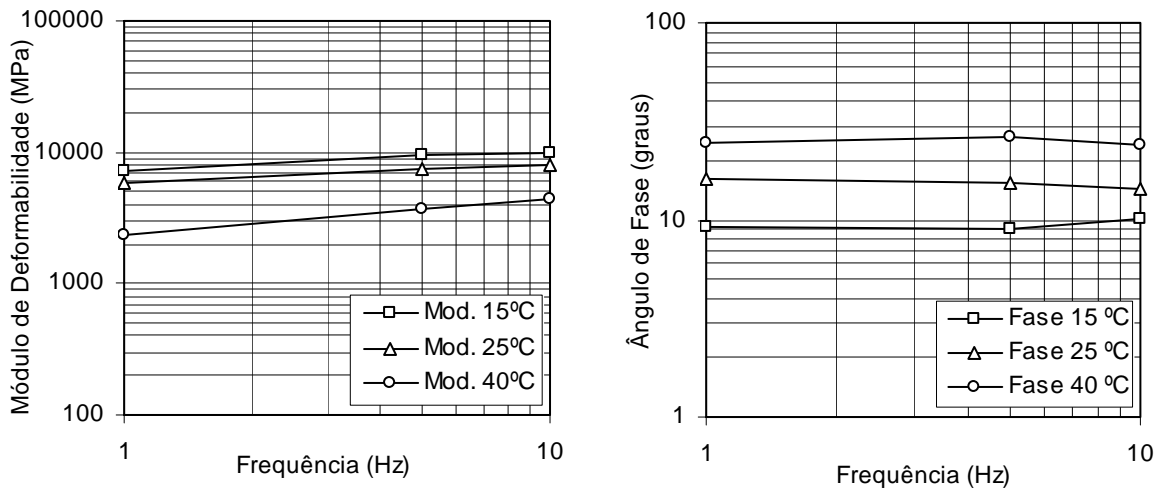


Figura II.6 – Variação do módulo de deformabilidade e do ângulo de fase da mistura LF

Quadro II.20 – Módulos de deformabilidade e ângulos de fase da mistura LG

Provete	Temperatura (°C)	Módulo de Deformabilidade (MPa)			Ângulo de Fase (graus)		
		10 Hz	5 Hz	1 Hz	10 Hz	5 Hz	1 Hz
LG-V04	15	9576	8805	6647	12,9	12,1	14,1
LG-V07	15	10023	9765	7386	11,5	13,2	12,8
LG-V10	15	9215	8490	6317	10,7	10,7	11,3
Valor médio		9605	9020	6783	11,7	12,0	12,7
LG-V03	25	7205	6513	4333	17,6	19,1	18,9
LG-V06	25	7013	6512	4260	18,2	19,7	19,2
LG-V09	25	6400	5326	3669	20,7	22,1	23,1
Valor médio		6873	6117	4087	18,8	20,3	20,4
LG-V02	40	3109	2480	1734	29,0	28,7	24,8
LG-V05	40	3569	2873	1906	26,9	28,2	24,9
LG-V11	40	2711	2145	1348	31,8	31,8	29,7
Valor médio		3130	2499	1663	29,2	29,6	26,5

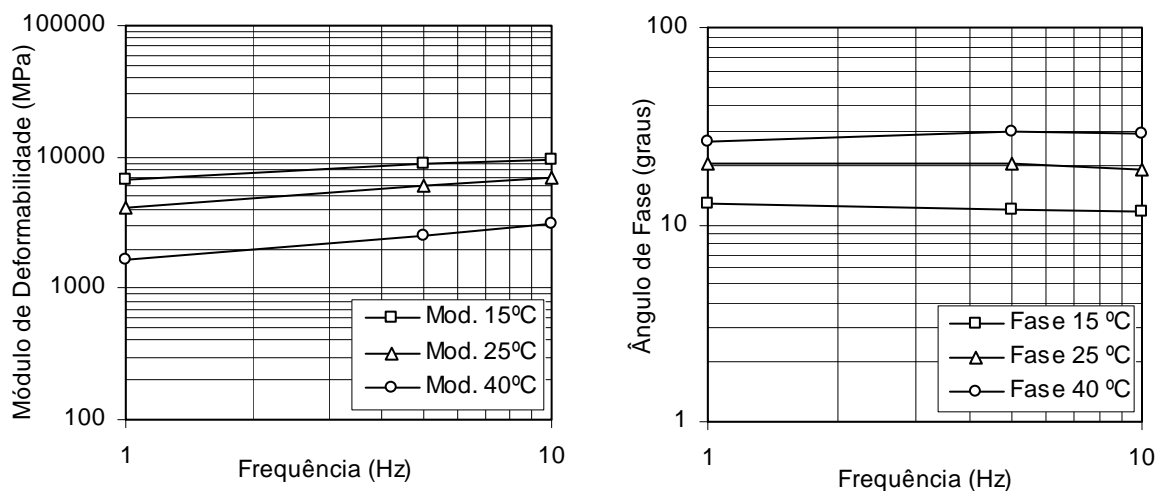


Figura II.7 – Variação do módulo de deformabilidade e do ângulo de fase da mistura LG

Quadro II.21 – Módulos de deformabilidade e ângulos de fase da mistura LH

Provet	Temperatura (°C)	Módulo de Deformabilidade (MPa)			Ângulo de Fase (graus)		
		10 Hz	5 Hz	1 Hz	10 Hz	5 Hz	1 Hz
LH-V01	15	9877	9559	7000	10,0	10,1	10,5
LH-V07	15	9687	9463	7359	10,8	11,1	10,4
LH-V10	15	9968	9547	7239	12,3	13,2	14,0
Valor médio		9844	9523	7199	11,0	11,5	11,6
LH-V03	25	6639	6234	4538	14,4	15,8	15,5
LH-V06	25	7907	7333	4909	16,8	18,3	17,3
LH-V09	25	7931	7060	4536	18,8	19,5	19,9
Valor médio		7492	6876	4661	16,7	17,9	17,6
LH-V02	40	4169	3419	2188	22,6	24,5	21,5
LH-V05	40	3878	3103	2139	26,5	26,9	24,8
LH-V11	40	3291	2593	1696	28,7	29,6	26,6
Valor médio		3779	3038	2008	25,9	27,0	24,3

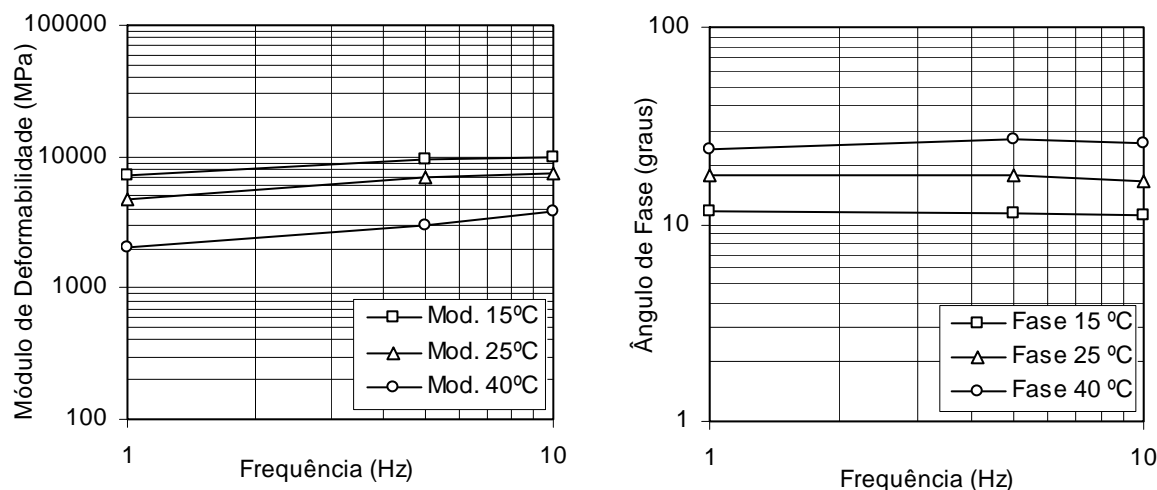


Figura II.8 – Variação do módulo de deformabilidade e do ângulo de fase da mistura LH

Quadro II.22 – Resumo da média dos módulos de deformabilidade e dos ângulos de fase das misturas de macadame betuminoso produzidas em laboratório (Temperatura de 15 °C)

Mistura	Módulo de Deformabilidade (MPa)			Ângulo de Fase (graus)		
	10 Hz	5 Hz	1 Hz	10 Hz	5 Hz	1 Hz
LA	10838	10482	7071	14,4	15,0	17,9
LB	11145	10943	8056	10,4	11,5	12,1
LC	11200	10843	8464	10,5	10,5	10,5
LD	11127	10490	8114	9,4	9,5	10,6
LE	11136	10642	8077	10,7	10,8	11,0
LF	9763	9689	7225	10,1	8,9	9,2
LG	9605	9020	6783	11,7	12,0	12,7
LH	9844	9523	7199	11,0	11,5	11,6

Quadro II.23 – Resumo da média dos módulos de deformabilidade e dos ângulos de fase das misturas de macadame betuminoso produzidas em laboratório (Temperatura de 25 °C)

Mistura	Módulo de Deformabilidade (MPa)			Ângulo de Fase (graus)		
	10 Hz	5 Hz	1 Hz	10 Hz	5 Hz	1 Hz
LA	7024	5670	3401	27,8	30,9	33,0
LB	8258	7434	4977	19,5	21,4	22,3
LC	9301	8351	5912	17,2	19,0	20,4
LD	8793	8372	5707	14,5	16,3	16,9
LE	7897	7489	5497	15,9	17,4	18,6
LF	7992	7573	5905	14,5	15,5	16,1
LG	6873	6117	4087	18,8	20,3	20,4
LH	7492	6876	4661	16,7	17,9	17,6

Quadro II.24 – Resumo da média dos módulos de deformabilidade e dos ângulos de fase das misturas de macadame betuminoso produzidas em laboratório (Temperatura de 40 °C)

Mistura	Módulo de Deformabilidade (MPa)			Ângulo de Fase (graus)		
	10 Hz	5 Hz	1 Hz	10 Hz	5 Hz	1 Hz
LA	2314	1737	1078	40,6	40,4	32,8
LB	3481	2684	1729	32,9	33,6	28,0
LC	4085	3247	2160	30,1	31,0	28,0
LD	4606	3692	2402	28,2	30,1	27,3
LE	4085	3222	1988	28,9	30,1	27,2
LF	4460	3709	2375	24,2	26,3	24,7
LG	3130	2499	1663	29,2	29,6	26,5
LH	3779	3038	2008	25,9	27,0	24,3

II.4 Resistência à Fadiga

A seguir apresenta-se um resumo dos resultados, em termos de resistência à fadiga, para as oito misturas de macadame betuminosos produzidas em laboratório, obtidos nas seguintes condições: frequência de 10 Hz; temperatura de 25°C; três níveis de extensão.

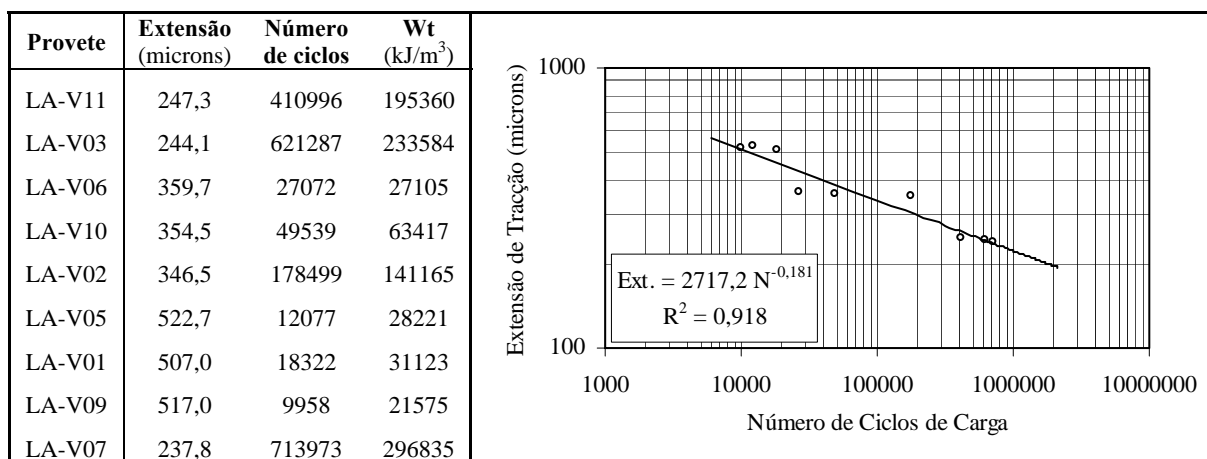


Figura II.9 – Lei de fadiga da mistura LA

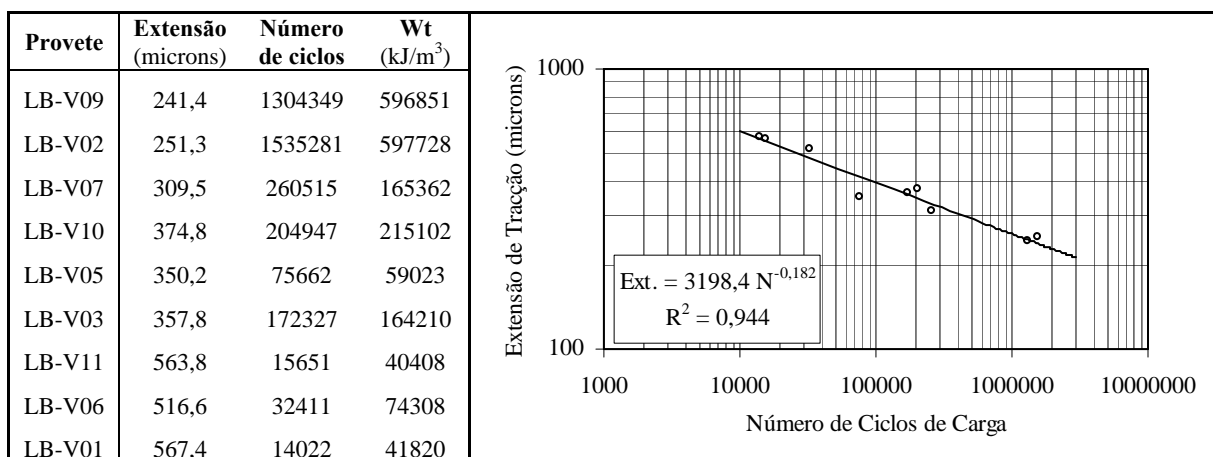


Figura II.10 – Lei de fadiga da mistura LB

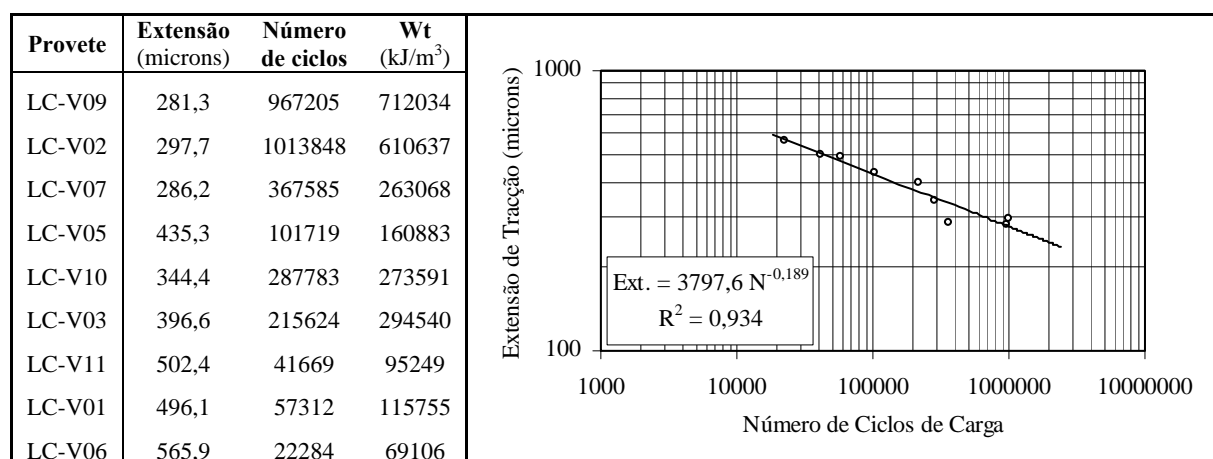


Figura II.11 – Lei de fadiga da mistura LC

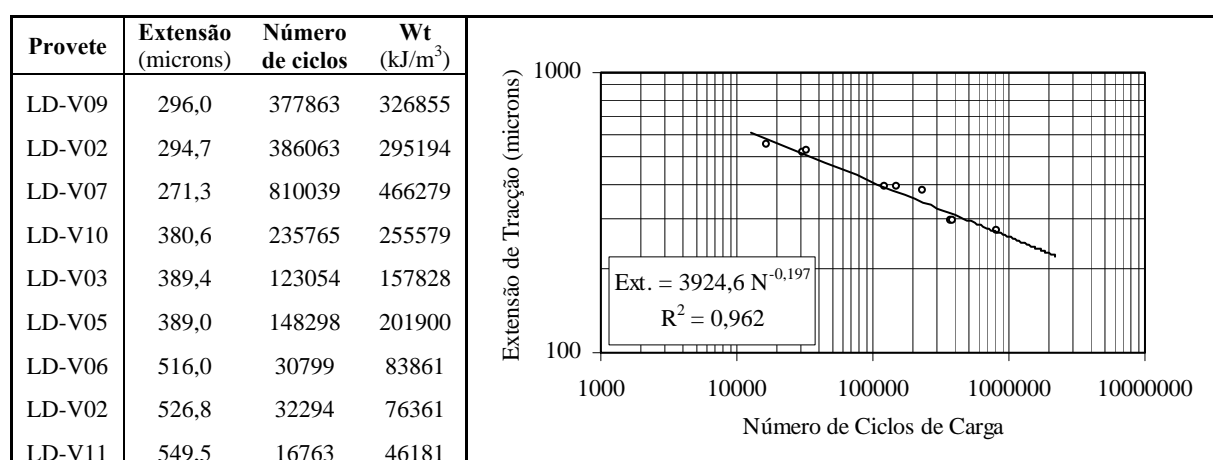


Figura II.12 – Lei de fadiga da mistura LD

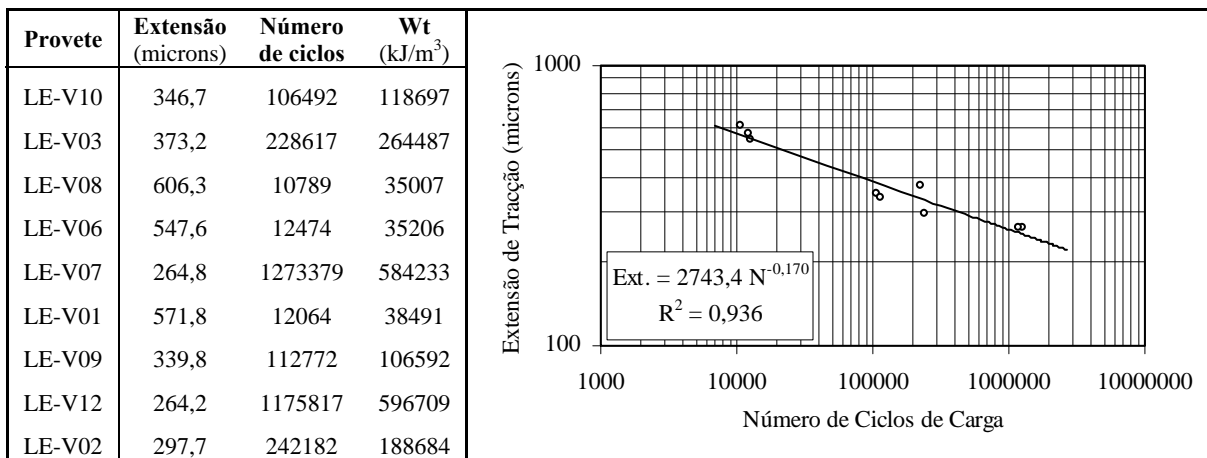


Figura II.13 – Lei de fadiga da mistura LE

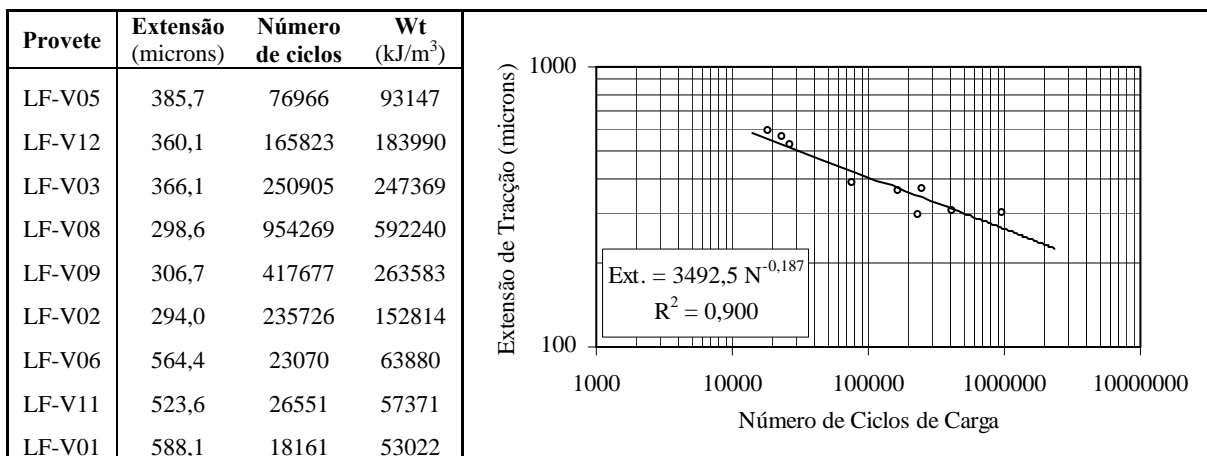


Figura II.14 – Lei de fadiga da mistura LF

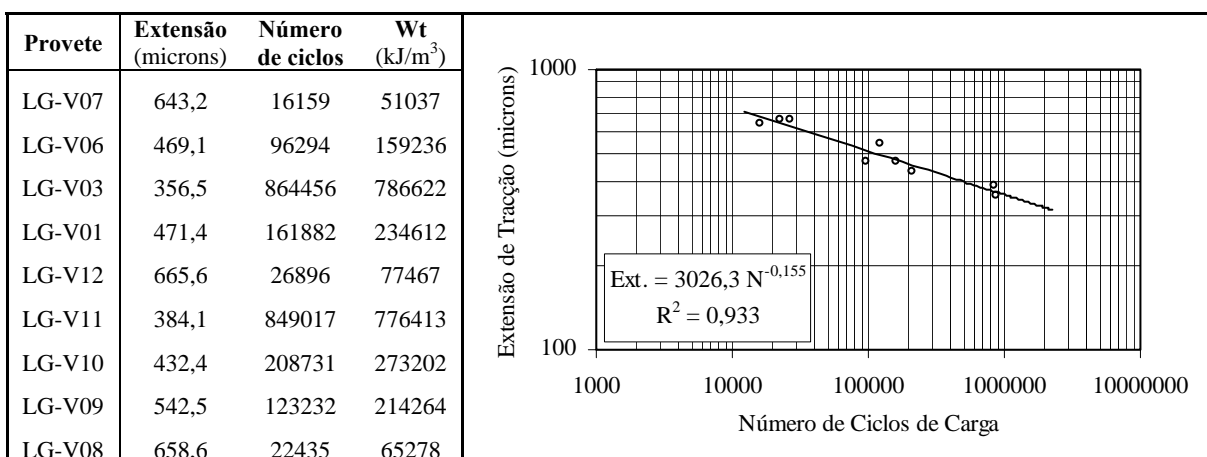


Figura II.15 – Lei de fadiga da mistura LG

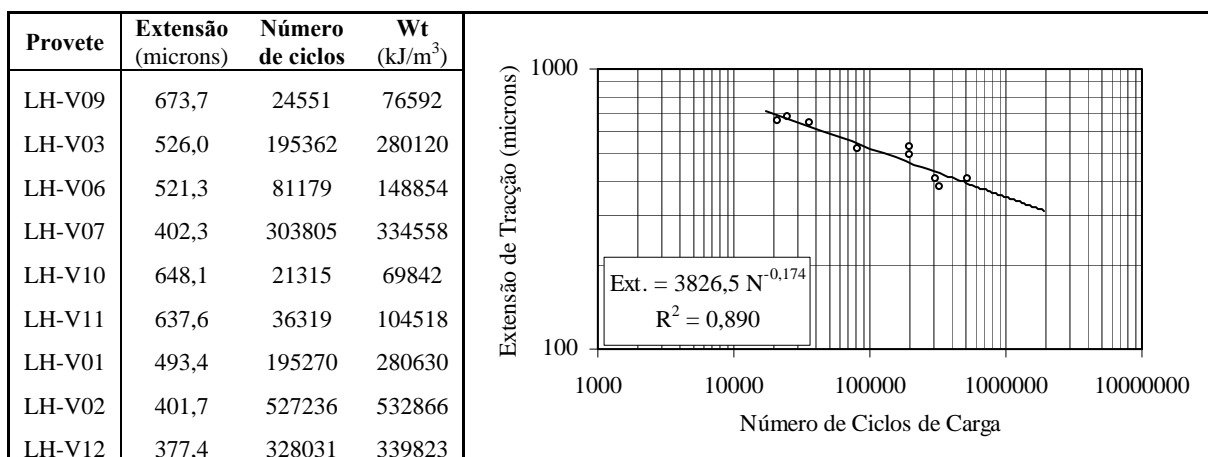


Figura II.16 – Lei de fadiga da mistura LH

Quadro II.25 – Resumo dos parâmetros das leis de fadiga das misturas de macadame betuminoso produzidas em laboratório e extensão correspondente a um milhão de ciclos (ϵ_6)

Mistura	A	B	ϵ_6 (microns)
LA	2717,2	-0,181	223
LB	3198,4	-0,182	259
LC	3797,6	-0,189	279
LD	3924,6	-0,197	258
LE	2743,0	-0,170	262
LF	3492,5	-0,187	264
LG	3026,3	-0,155	356
LH	3826,5	-0,174	346

II.5 Resistência à Deformação Permanente - Compressão Uniaxial

O desempenho à deformação permanente das misturas de macadame betuminoso produzidas em laboratório, foi avaliado recorrendo a ensaios de compressão uniaxial cíclicos. Os ensaios foram realizados a uma temperatura de 45°C e para uma tensão máxima de 150 kPa, o carregamento respeitou uma frequência de 1 Hz com repouso de 1 segundo e a duração do ensaio foi de 3600 ciclos.

Nos resultados que se seguem indicam-se os valores dos parâmetros seguintes: a altura do provete (h), expressa em mm; a extensão axial permanente no final do ensaio (ϵ_{3600}), expressa em microns; a velocidade de deformação (Vdef), expressa em microns/ciclo; o módulo de fluência (S_N), em MPa; o módulo resiliente (E_r), em MPa; os parâmetros A e B de ajuste à curva de deformação do tipo $\epsilon_N = A \times N^B$; a extensão correspondente ao ciclo 1000 ($\epsilon_{1000,calc}$), expressa em microns.

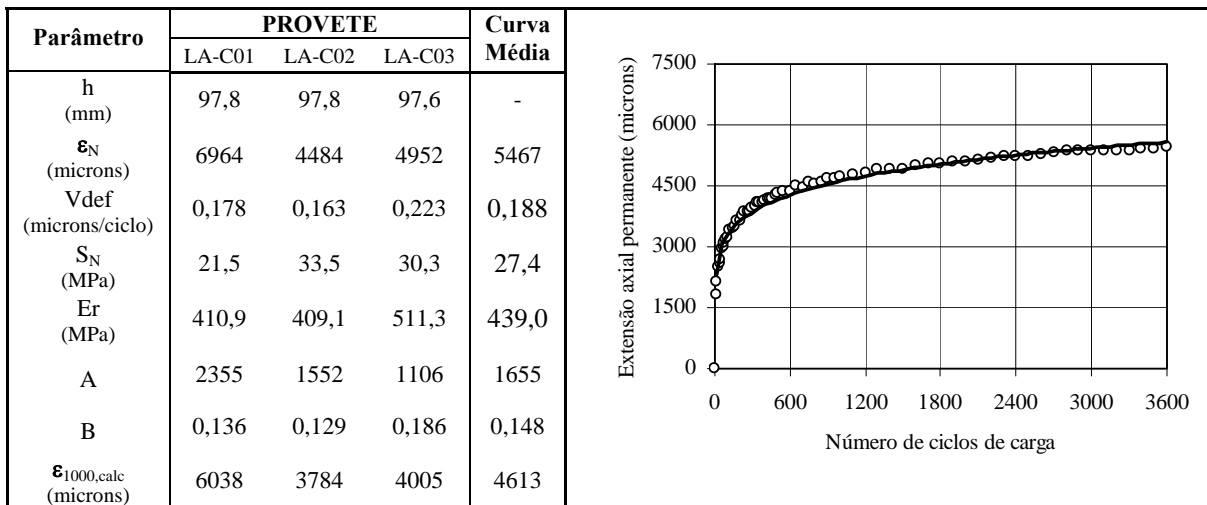


Figura II.17 – Curvas de deformação permanente da mistura LA e respectivos parâmetros

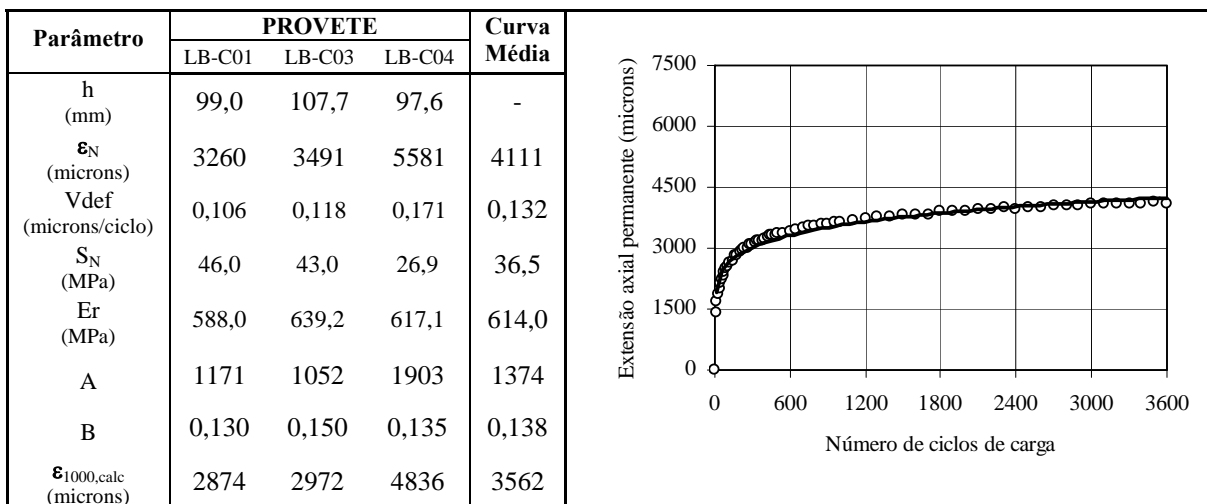


Figura II.18 – Curvas de deformação permanente da mistura LB e respectivos parâmetros

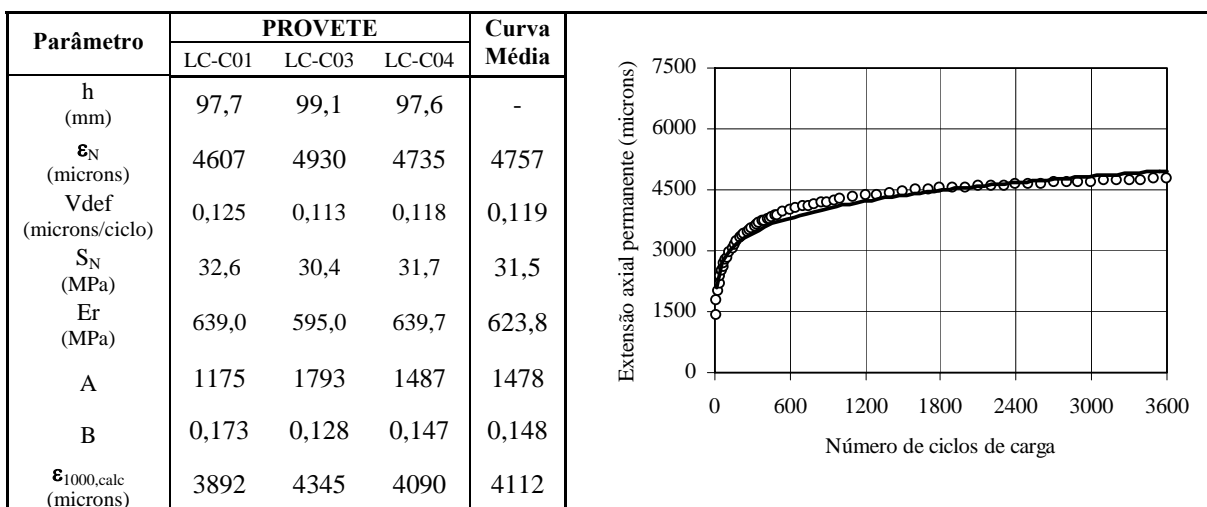


Figura II.19 – Curvas de deformação permanente da mistura LC e respectivos parâmetros

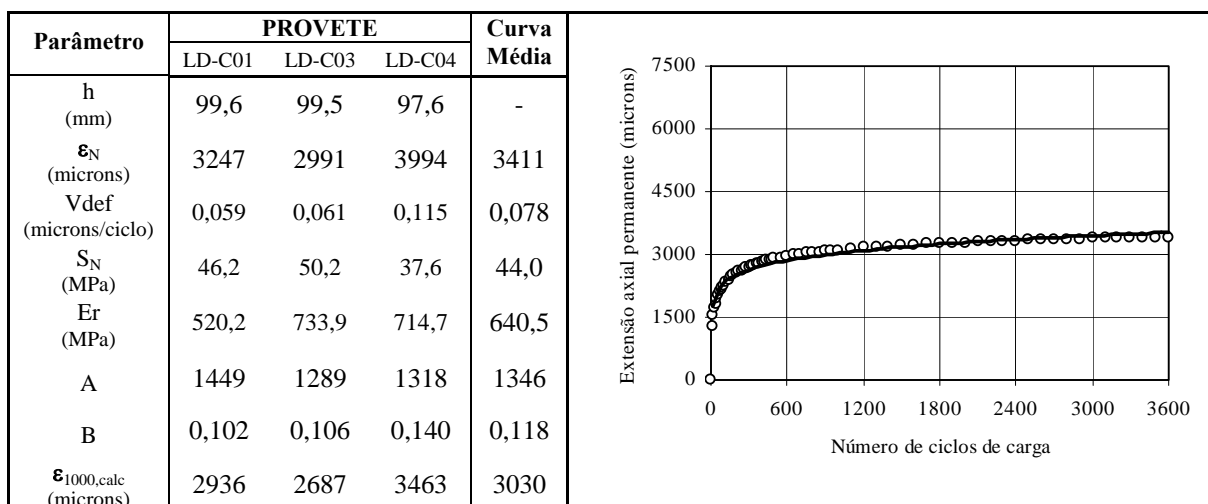


Figura II.20 – Curvas de deformação permanente da mistura LD e respectivos parâmetros

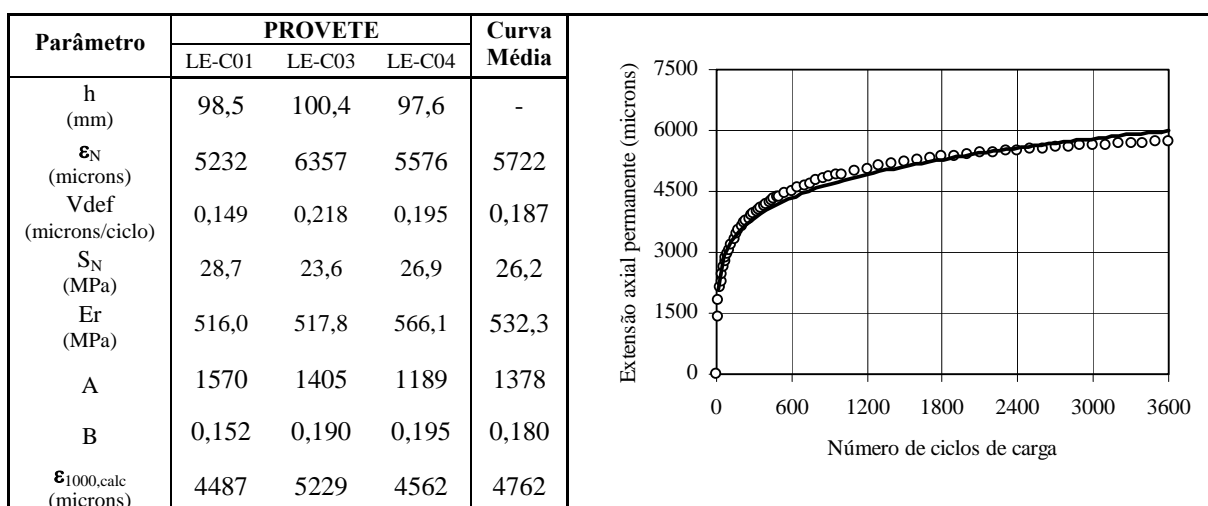


Figura II.21 – Curvas de deformação permanente da mistura LE e respectivos parâmetros

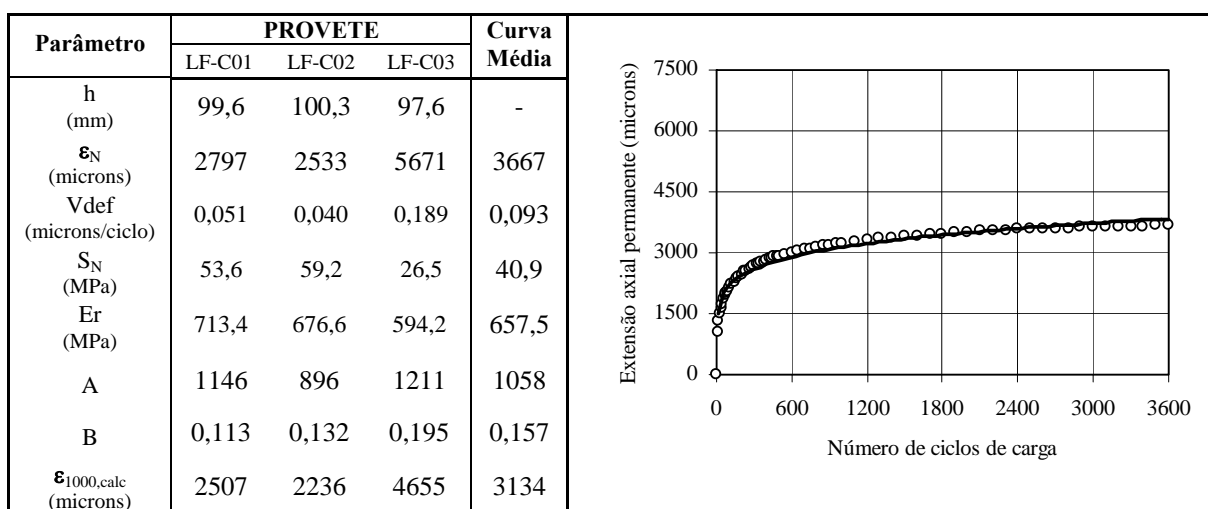


Figura II.22 – Curvas de deformação permanente da mistura LF e respectivos parâmetros

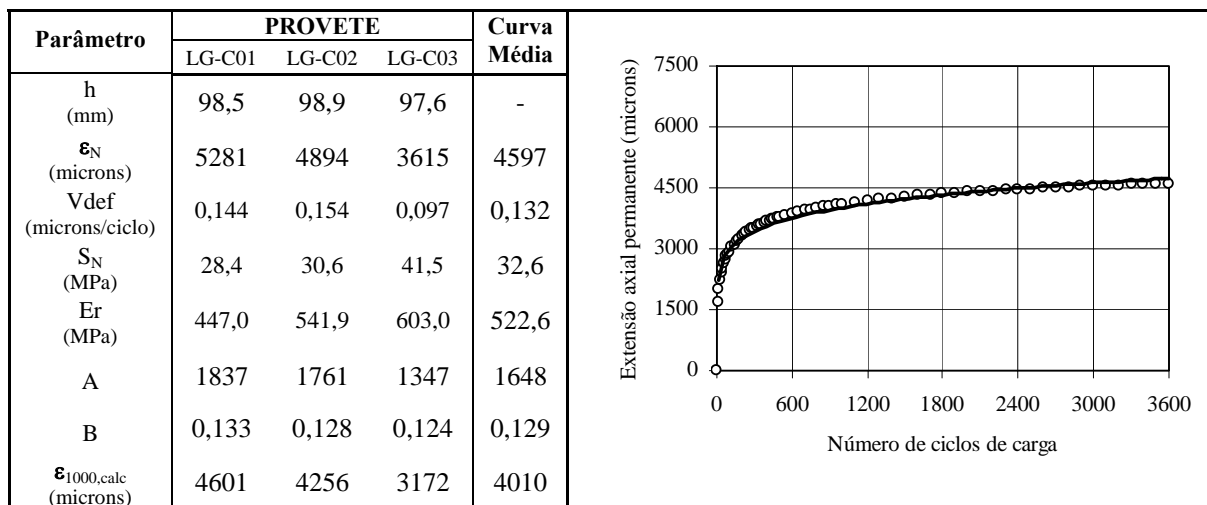


Figura II.23 – Curvas de deformação permanente da mistura LG e respectivos parâmetros

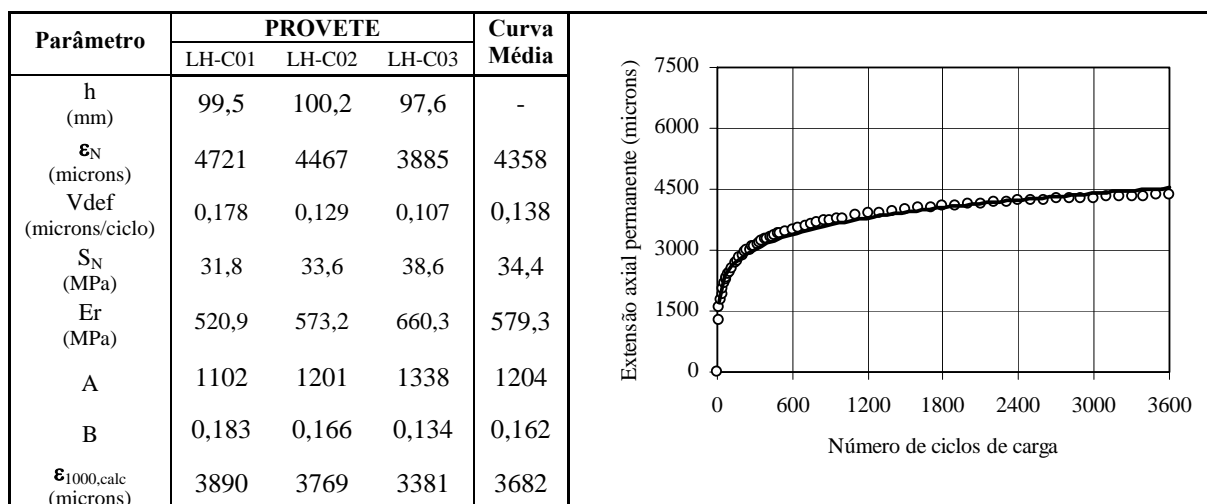


Figura II.24 – Curvas de deformação permanente da mistura LH e respectivos parâmetros

Quadro II.26 – Resumo dos resultados obtidos nos ensaios de compressão uniaxial cíclicos com as misturas de macadame betuminoso produzidas em laboratório

Mistura	ϵ_{3600} (microns)	Vdef (mm/minlo)	S_N (MPa)	E_r (MPa)	A	B	$\epsilon_{1000,calc}$ (microns)
LA	5467	0,188	27,4	439,0	1655	0,148	4613
LB	4111	0,132	36,5	614,0	1374	0,138	3562
LC	4757	0,119	31,5	623,8	1478	0,148	4112
LD	3411	0,078	44,0	640,5	1346	0,118	3030
LE	5722	0,187	26,2	532,3	1378	0,180	4762
LF	3667	0,093	40,9	657,5	1058	0,157	3134
LG	4597	0,132	32,6	522,6	1648	0,129	4010
LH	4358	0,138	34,4	579,3	1204	0,162	3682

ANEXO III – RESULTADOS DOS ENSAIOS SOBRE PROVETES DE BETÃO BETUMINOSO PRODUZIDOS EM LABORATÓRIO

III.1 Designação das Misturas

Neste anexo apresentam-se os resultados experimentais dos ensaios de desempenho, realizados sobre provetes das quatro misturas de betão betuminoso produzidas e compactadas em laboratório (Quadro III.1).

Quadro III.1 – Misturas de betão betuminoso produzidas e compactadas em laboratório

Número da Mistura	Designação da Mistura	Tipo de Mistura	TR (%)	Betume Novo	pb _R (%)	pb _N (%)
21	M1	BD	0	50/70	4,7	4,7
22	M2	BD	0	50/70	5,2	5,2
23	R1	BD _R	30	50/70	4,4	3,0
24	R2	BD _R	30	50/70	4,9	3,5

III.2 Características Gerais das Misturas

Antes dos resultados dos ensaios de desempenho, apresentam-se as características gerais dos provetes ensaiados. Nos Quadros III.2, III.3, III.4 e III.5, indicam-se as propriedades de todas as vigas de 6 × 6 × 40 cm³ disponíveis, usadas nos ensaios de flexão, e nos Quadros III.6 e III.7 as dos provetes cilíndricos de 150 mm de diâmetro, usados nos ensaios de compressão uniaxial, antes e depois de colados respectivamente.

Quadro III.2 – Características gerais das vigas de betão betuminoso, compactadas em laboratório, usadas nos ensaios de flexão de cargas repetidas (Mistura M1)

PROVETE	Bm (g/cm ³)	Bt (g/cm ³)	n (%)	TVB (%)	VMA (%)	Sb (%)
M1-V01	2,357	2,468	4,5	10,8	15,3	70,5
M1-V02	2,357	2,468	4,5	10,8	15,3	70,5
M1-V03	2,359	2,468	4,4	10,8	15,2	70,9
M1-V04	2,363	2,468	4,2	10,8	15,0	71,8
M1-V05	2,357	2,468	4,5	10,8	15,3	70,5
M1-V06	2,368	2,468	4,1	10,8	14,9	72,6
M1-V07	2,357	2,468	4,5	10,8	15,3	70,5
M1-V08	2,363	2,468	4,2	10,8	15,0	71,8
M1-V09	2,354	2,468	4,6	10,7	15,4	70,0
M1-V10	2,362	2,468	4,3	10,8	15,1	71,5
M1-Média	2,360	2,468	4,4	10,8	15,2	71,1

Quadro III.3 – Características gerais das vigas de betão betuminoso, compactadas em laboratório e usadas nos ensaios de flexão de cargas repetidas (Mistura M2)

PROVETE	Bm (g/cm ³)	Bt (g/cm ³)	n (%)	TVB (%)	VMA (%)	Sb (%)
M2-V01	2,387	2,452	2,7	12,0	14,7	81,9
M2-V02	2,384	2,452	2,8	12,0	14,8	81,2
M2-V03	2,389	2,452	2,6	12,1	14,6	82,5
M2-V04	2,386	2,452	2,7	12,0	14,7	81,7
M2-V05	2,389	2,452	2,6	12,1	14,6	82,3
M2-V06	2,387	2,452	2,6	12,1	14,7	82,0
M2-V07	2,390	2,452	2,5	12,1	14,6	82,6
M2-V08	2,382	2,452	2,9	12,0	14,9	80,7
M2-V09	2,383	2,452	2,8	12,0	14,9	81,0
M2-V10	2,389	2,452	2,6	12,1	14,6	82,5
M2-Média	2,386	2,452	2,7	12,0	14,7	81,8

Quadro III.4 – Características gerais das vigas de betão betuminoso, compactadas em laboratório e usadas nos ensaios de flexão de cargas repetidas (Mistura R1)

PROVETE	Bm (g/cm ³)	Bt (g/cm ³)	n (%)	TVB (%)	VMA (%)	Sb (%)
R1-V01	2,372	2,482	4,4	10,1	14,6	69,6
R1-V02	2,366	2,482	4,7	10,1	14,8	68,4
R1-V03	2,381	2,482	4,1	10,2	14,2	71,4
R1-V04	2,382	2,482	4,0	10,2	14,2	71,6
R1-V05	2,383	2,482	4,0	10,2	14,2	71,8
R1-V06	2,367	2,482	4,6	10,1	14,7	68,7
R1-V07	2,378	2,482	4,2	10,2	14,3	70,9
R1-V08	2,381	2,482	4,1	10,2	14,2	71,5
R1-V09	2,370	2,482	4,5	10,1	14,6	69,2
R1-V10	2,376	2,482	4,3	10,2	14,4	70,4
R1-Média	2,376	2,482	4,3	10,1	14,4	70,3

Quadro III.5 – Características gerais das vigas de betão betuminoso, compactadas em laboratório e usadas nos ensaios de flexão de cargas repetida (Mistura R2)

PROVETE	Bm (g/cm ³)	Bt (g/cm ³)	n (%)	TVB (%)	VMA (%)	Sb (%)
R2-V01	2,379	2,464	3,5	11,3	14,8	76,6
R2-V02	2,390	2,464	3,0	11,4	14,4	79,2
R2-V03	2,388	2,464	3,1	11,4	14,5	78,6
R2-V04	2,384	2,464	3,2	11,3	14,6	77,9
R2-V05	2,387	2,464	3,1	11,4	14,5	78,5
R2-V06	2,383	2,464	3,3	11,3	14,6	77,6
R2-V07	2,381	2,464	3,4	11,3	14,7	77,0
R2-V08	2,389	2,464	3,1	11,4	14,4	78,8
R2-V09	2,391	2,464	3,0	11,4	14,3	79,4
R2-V10	2,388	2,464	3,1	11,4	14,4	78,7
R2-Média	2,386	2,464	3,2	11,4	14,5	78,2

Quadro III.6 – Características gerais dos provetes cilíndricos de betão betuminoso, compactados em laboratório e usados nos ensaios de compressão uniaxial (Rectificados)

PROVETE	Bm (g/cm ³)	Bt (g/cm ³)	n (%)	TVB (%)	VMA (%)	Sb (%)
M1-C01	2,389	2,468	3,2	10,9	14,1	77,3
M1-C02	2,382	2,468	3,5	10,9	14,4	75,7
M1-C03	2,369	2,468	4,0	10,8	14,8	72,9
M1-C04	2,372	2,468	3,9	10,8	14,7	73,6
M1-C05	2,379	2,468	3,6	10,9	14,5	75,1
M1-C06	2,377	2,468	3,7	10,8	14,5	74,6
M1-Média	2,378	2,468	3,6	10,9	14,5	74,9
M2-C01	2,387	2,452	2,7	12,1	14,7	82,0
M2-C02	2,388	2,452	2,6	12,1	14,7	82,2
M2-C03	2,377	2,452	3,1	12,0	15,1	79,7
M2-C04	2,389	2,452	2,6	12,1	14,6	82,4
M2-C05	2,389	2,452	2,6	12,1	14,6	82,4
M2-C06	2,377	2,452	3,1	12,0	15,1	79,7
M2-Média	2,385	2,452	2,8	12,0	14,8	81,4
R1-C01	2,380	2,482	4,1	10,2	14,3	71,2
R1-C02	2,375	2,482	4,3	10,1	14,5	70,2
R1-C03	2,361	2,482	4,9	10,1	15,0	67,4
R1-C04	2,378	2,482	4,2	10,2	14,3	70,8
R1-C05	2,383	2,482	4,0	10,2	14,2	71,8
R1-C06	2,376	2,482	4,3	10,1	14,4	70,4
R1-Média	2,376	2,482	4,3	10,1	14,4	70,3
R2-C01	2,389	2,464	3,0	11,4	14,4	78,9
R2-C02	2,399	2,464	2,6	11,4	14,1	81,2
R2-C03	2,396	2,464	2,8	11,4	14,2	80,5
R2-C04	2,378	2,464	3,5	11,3	14,8	76,4
R2-C05	2,393	2,464	2,9	11,4	14,3	79,8
R2-C06	2,397	2,464	2,7	11,4	14,1	80,7
R2-Média	2,392	2,464	2,9	11,4	14,3	79,6

Quadro III.7 – Características gerais dos provetes cilíndricos de betão betuminoso, compactados em laboratório e usados nos ensaios de compressão uniaxial (colados)

PROVETE	Bm (g/cm ³)	Bt (g/cm ³)	n (%)	TVB (%)	VMA (%)	Sb (%)
M1-C13	2,379	2,468	3,6	10,9	14,5	75,1
M1-C24	2,377	2,468	3,7	10,8	14,5	74,6
M1-C56	2,378	2,468	3,6	10,9	14,5	74,8
M1-Média	2,378	2,468	3,6	10,9	14,5	74,8
M2-C14	2,388	2,452	2,6	12,1	14,7	82,2
M2-C26	2,383	2,452	2,8	12,0	14,9	80,9
M2-C35	2,383	2,452	2,8	12,0	14,8	81,0
M2-Média	2,385	2,452	2,8	12,0	14,8	81,4
R1-C12	2,378	2,482	4,2	10,2	14,4	70,7
R1-C35	2,372	2,482	4,4	10,1	14,6	69,6
R1-C46	2,377	2,482	4,2	10,2	14,4	70,6
R1-Média	2,376	2,482	4,3	10,1	14,4	70,3
R2-C13	2,393	2,464	2,9	11,4	14,3	79,7
R2-C24	2,389	2,464	3,1	11,4	14,4	78,8
R2-C56	2,395	2,464	2,8	11,4	14,2	80,3
R2-Média	2,392	2,464	2,9	11,4	14,3	79,6

III.3 Módulos de Deformabilidade e Ângulos de Fase

A seguir apresenta-se um resumo dos resultados, em termos de módulos de deformabilidade e de ângulos de fase, para as quatro misturas de betão betuminoso produzidas em laboratório, obtidos nas seguintes condições:

- Frequências de 10 Hz, 5 Hz e 1 Hz;
- Temperaturas de 15°C, 25°C e 40°C;
- Extensão controlada de 100 microns.

Quadro III.8 – Módulos de deformabilidade e ângulos de fase da mistura M1

Provete	Temperatura (°C)	Módulo de Deformabilidade (MPa)			Ângulo de Fase (graus)		
		10 Hz	5 Hz	1 Hz	10 Hz	5 Hz	1 Hz
M1-V01	15	8539	7322	5259	22,2	23,2	22,9
M1-V03	15	8917	7723	5427	22,0	24,1	23,5
M1-V08	15	10170	8652	5937	22,1	23,1	21,6
Valor médio		9209	7899	5541	22,1	23,5	22,7
M1-V02	25	4722	3989	2685	33,1	30,9	27,3
M1-V05	25	4657	3932	2653	30,3	33,4	31,0
M1-V06	25	4972	4129	2827	31,2	30,6	27,4
Valor médio		4784	4017	2722	31,5	31,6	28,6
M1-V04	40	1860	1614	1231	35,7	31,3	21,7
M1-V09	40	1856	1613	1137	37,4	34,2	22,9
M1-V10	40	1847	1582	1254	39,5	31,7	21,0
Valor médio		1854	1603	1207	37,5	32,4	21,9

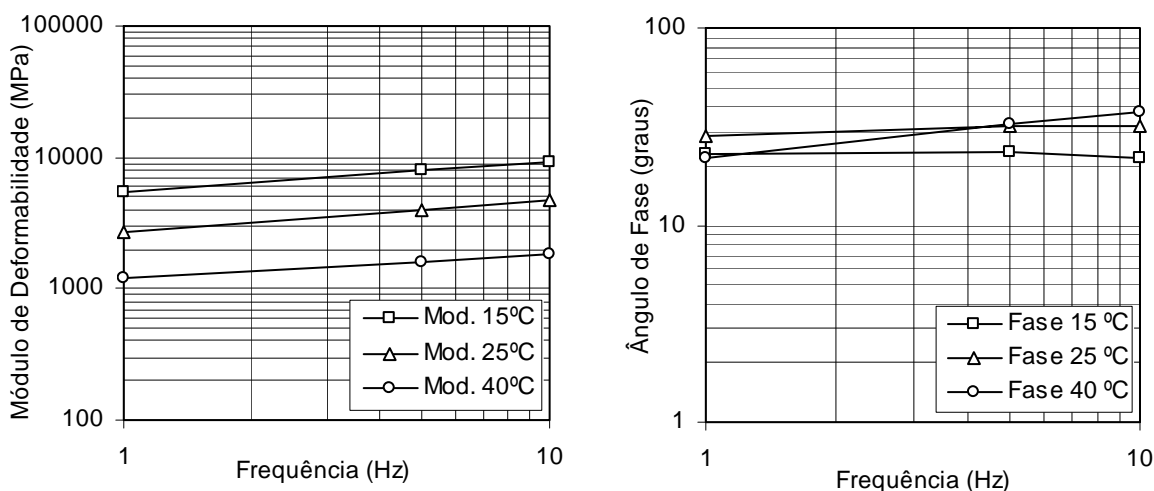


Figura III.1 – Variação do módulo de deformabilidade e do ângulo de fase da mistura M1

Quadro III.9 – Módulos de deformabilidade e ângulos de fase da mistura M2

Provete	Temperatura (°C)	Módulo de Deformabilidade (MPa)			Ângulo de Fase (graus)		
		10 Hz	5 Hz	1 Hz	10 Hz	5 Hz	1 Hz
M2-V01	15	8985	7533	5352	25,7	28,2	27,4
M2-V03	15	9921	8438	6007	23,6	24,0	21,9
M2-V08	15	7748	6822	4590	25,8	26,7	25,9
Valor médio		8885	7598	5316	25,0	26,3	25,1
M2-V02	25	4502	3597	2516	31,0	31,1	26,8
M2-V05	25	4685	3887	2569	32,0	32,0	27,8
M2-V06	25	4228	3516	2410	32,4	32,4	28,2
Valor médio		4472	3667	2498	31,8	31,8	27,6
M2-V04	40	1862	1561	1198	39,6	35,0	27,3
M2-V09	40	1581	1394	1189	36,7	32,4	22,7
M2-V10	40	1385	1289	1081	41,1	38,7	24,9
Valor médio		1609	1415	1156	39,1	35,4	25,0

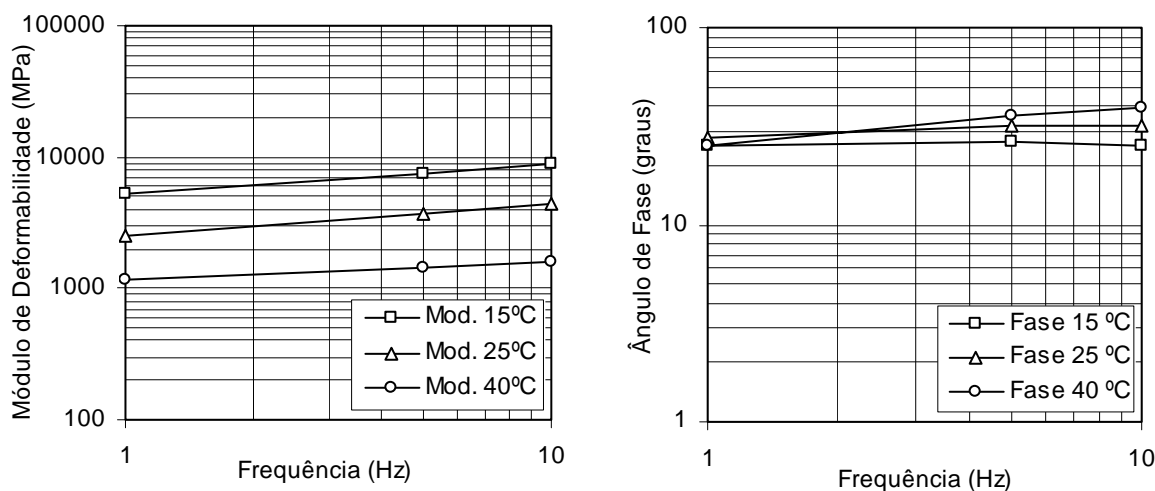


Figura III.2 – Variação do módulo de deformabilidade e do ângulo de fase da mistura M2

Quadro III.10 – Módulos de deformabilidade e ângulos de fase da mistura R1

Provete	Temperatura (°C)	Módulo de Deformabilidade (MPa)			Ângulo de Fase (graus)		
		10 Hz	5 Hz	1 Hz	10 Hz	5 Hz	1 Hz
R1-V02	15	10575	9450	6946	17,9	18,3	18,2
R1-V05	15	11688	10452	7668	16,7	17,9	17,5
R1-V07	15	12847	11371	8145	17,0	17,7	17,3
Valor médio		11703	10424	7586	17,2	18,0	17,7
R1-V03	25	7304	6225	4428	24,4	24,8	23,2
R1-V06	25	7341	6284	4327	24,2	25,9	24,3
R1-V08	25	7879	6644	4560	24,9	24,8	23,6
Valor médio		7508	6384	4438	24,5	25,2	23,7
R1-V04	40	3151	2447	1779	34,0	33,7	26,2
R1-V09	40	2686	2262	1598	35,9	34,7	26,6
R1-V10	40	3110	2649	1896	33,4	33,0	26,3
Valor médio		2982	2453	1758	34,4	33,8	26,4

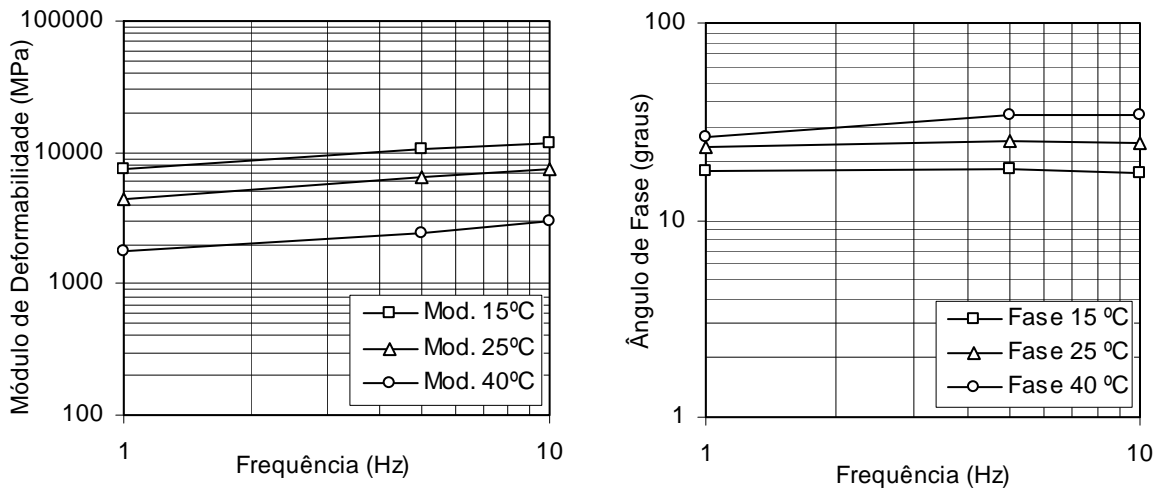


Figura III.3 – Variação do módulo de deformabilidade e do ângulo de fase da mistura R1

Quadro III.11 – Módulos de deformabilidade e ângulos de fase da mistura R2

Provete	Temperatura (°C)	Módulo de Deformabilidade (MPa)			Ângulo de Fase (graus)		
		10 Hz	5 Hz	1 Hz	10 Hz	5 Hz	1 Hz
R2-V02	15	11380	10247	7338	18,1	19,3	18,7
R2-V05	15	12584	11198	8386	18,4	19,0	18,9
R2-V07	15	12987	11606	8250	18,6	19,3	19,5
Valor médio		12317	11017	7991	18,4	19,2	19,0
R2-V04	25	6694	5767	3995	24,8	26,3	24,7
R2-V06	25	7239	5962	4178	27,5	28,5	27,2
R2-V09	25	7009	5647	4026	29,3	29,3	28,6
Valor médio		6981	5792	4066	27,2	28,0	26,8
R2-V01	40	2724	2272	1743	32,7	32,0	23,6
R2-V08	40	2607	2146	1563	36,7	31,3	28,8
R2-V10	40	2674	2220	1601	34,7	32,5	25,2
Valor médio		2668	2213	1636	34,7	31,9	25,9

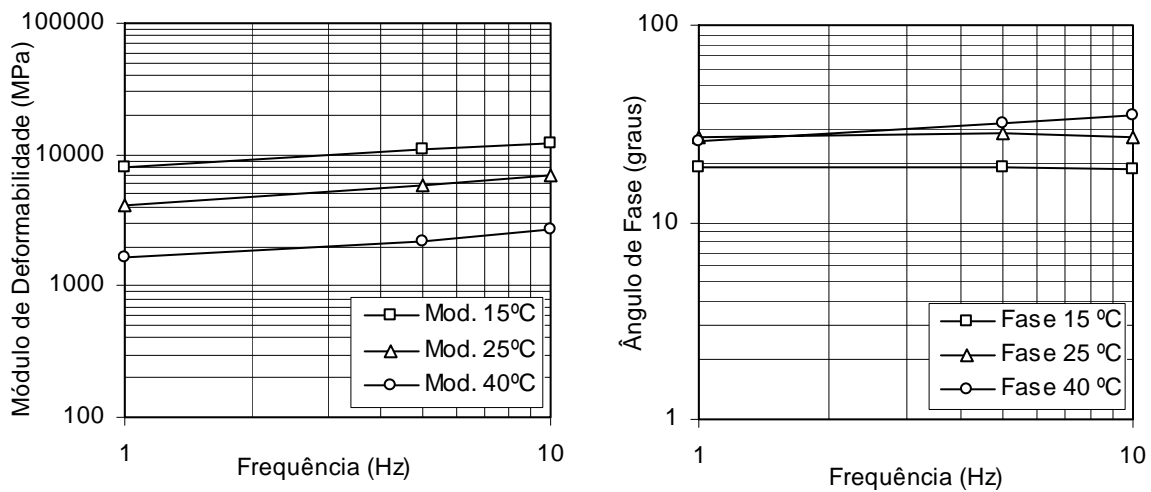


Figura III.4 – Variação do módulo de deformabilidade e do ângulo de fase da mistura R2

Quadro III.12 – Resumo dos módulos de deformabilidade e dos ângulos de fase das misturas de betão betuminoso produzidas em laboratório

Mistura	Temperatura (°C)	Módulo de Deformabilidade (MPa)			Ângulo de Fase (graus)		
		10 Hz	5 Hz	1 Hz	10 Hz	5 Hz	1 Hz
M1	15	9209	7899	5541	22,1	23,5	22,7
M2	15	8885	7598	5316	25,0	26,3	25,1
R1	15	11703	10424	7586	17,2	18,0	17,7
R2	15	12317	11017	7991	18,4	19,2	19,0
M1	25	4784	4017	2722	31,5	31,6	28,6
M2	25	4472	3667	2498	31,8	31,8	27,6
R1	25	7508	6384	4438	24,5	25,2	23,7
R2	25	6981	5792	4066	27,2	28,0	26,8
M1	40	1854	1603	1207	37,5	32,4	21,9
M2	40	1609	1415	1156	39,1	35,4	25,0
R1	40	2982	2453	1758	34,4	33,8	26,4
R2	40	2668	2213	1636	34,7	31,9	25,9

III.4 Resistência à Fadiga

A seguir apresenta-se um resumo dos resultados, em termos de resistência à fadiga, para as misturas de betão betuminoso produzidas e compactadas em laboratório, obtidos nas seguintes condições de ensaio:

- Frequência de 10 Hz;
- Temperatura de 25°C;
- Três níveis de extensão.

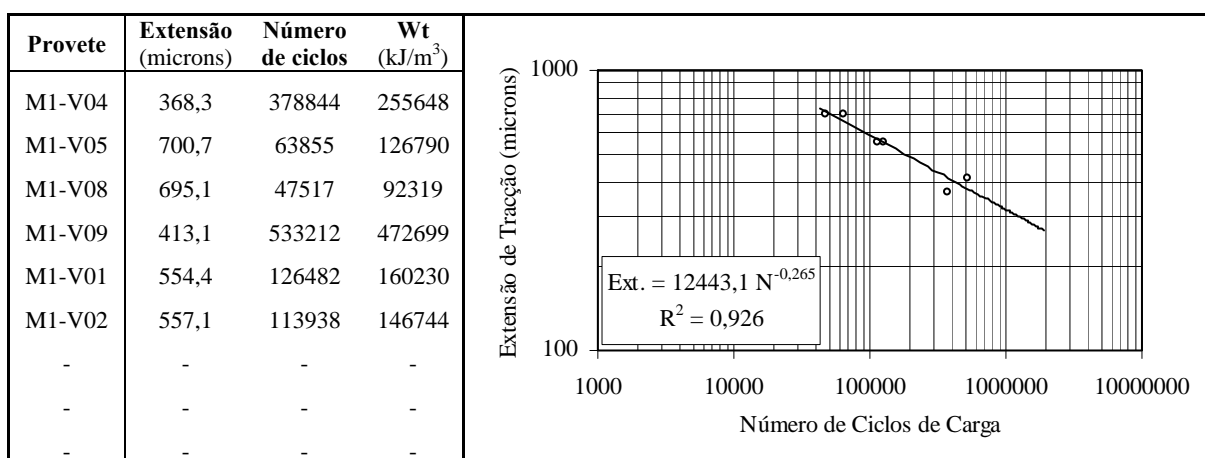


Figura III.5 – Lei de fadiga da mistura M1

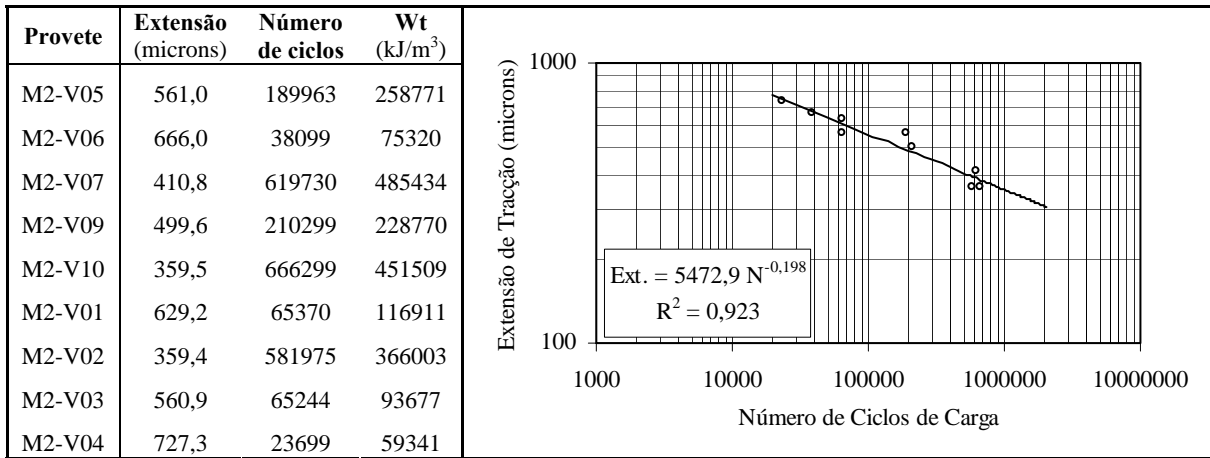


Figura III.6 – Lei de fadiga da mistura M2

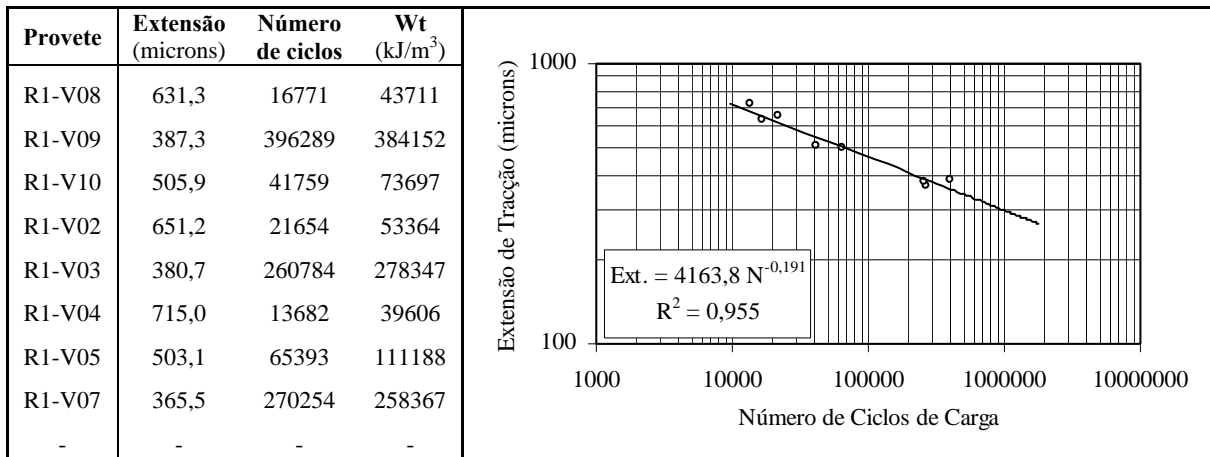


Figura III.7 – Lei de fadiga da mistura R1

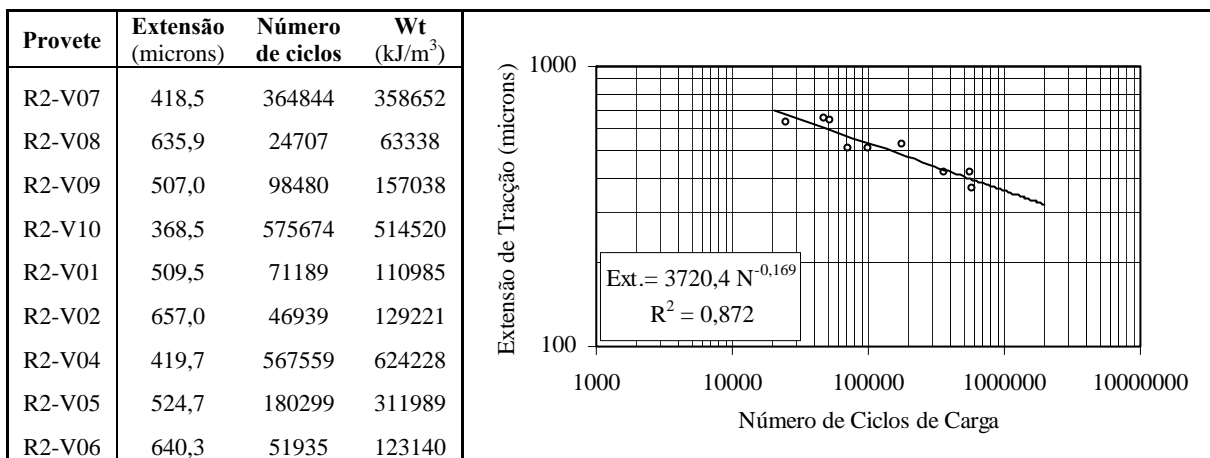


Figura III.8 – Lei de fadiga da mistura R2

Quadro III.13 – Resumo dos parâmetros das leis de fadiga das misturas de betão betuminoso produzidas em laboratório e extensão correspondente a um milhão de ciclos (ϵ_6)

Mistura	A	B	ϵ_6 (microns)
M1	12443,1	-0,265	320
M2	5472,9	-0,198	355
R1	4163,8	-0,191	298
R2	3720,0	-0,169	360

III.5 Resistência à Deformação Permanente - Compressão Uniaxial

O desempenho à deformação permanente das misturas de betão betuminoso produzidas em laboratório foi avaliado recorrendo a ensaios de compressão uniaxial cíclicos.

Os ensaios foram realizados a uma temperatura de 45°C e para uma tensão máxima de 150 kPa, o carregamento respeitou uma frequência de 1 Hz com repouso de 1 segundo e os ensaios duraram 3600 ciclos. Nos resultados que se seguem indicam-se os valores dos parâmetros seguintes:

- a altura do provete (h), expressa em mm;
- a extensão axial permanente no final do ensaio (ϵ_{3600}), expressa em microns;
- a velocidade de deformação (Vdef), expressa em microns/ciclo;
- o módulo de fluência (S_N), em MPa;
- o módulo resiliente (E_r), em MPa;
- os parâmetros A e B de ajuste à curva de deformação do tipo $\epsilon_N = AN^B$;
- a extensão correspondente ao ciclo 1000 ($\epsilon_{1000,calc}$), expressa em microns.

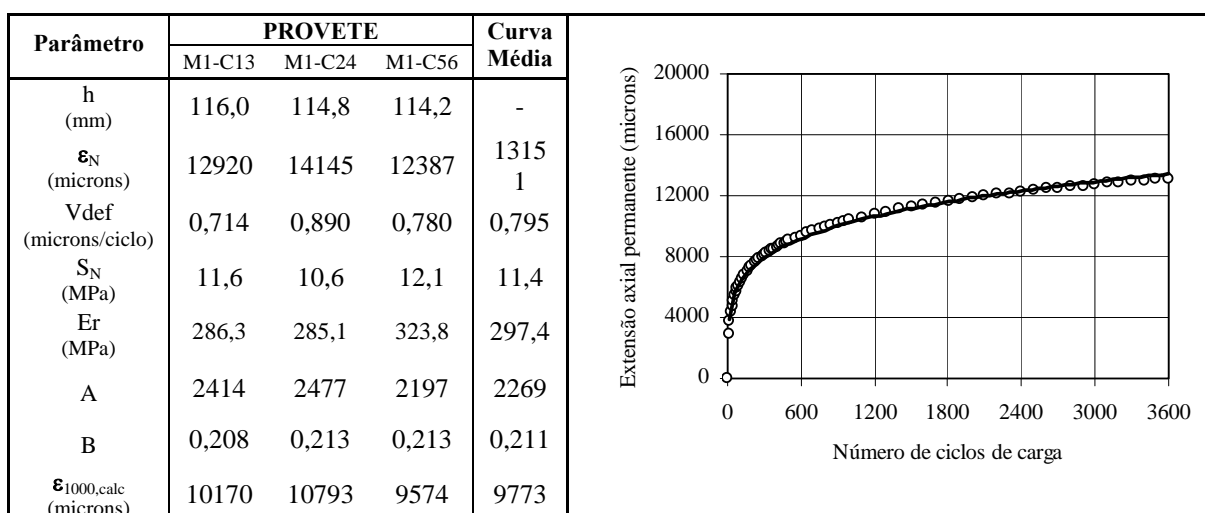


Figura III.9 – Curvas de deformação permanente da mistura M1 e respectivos parâmetros

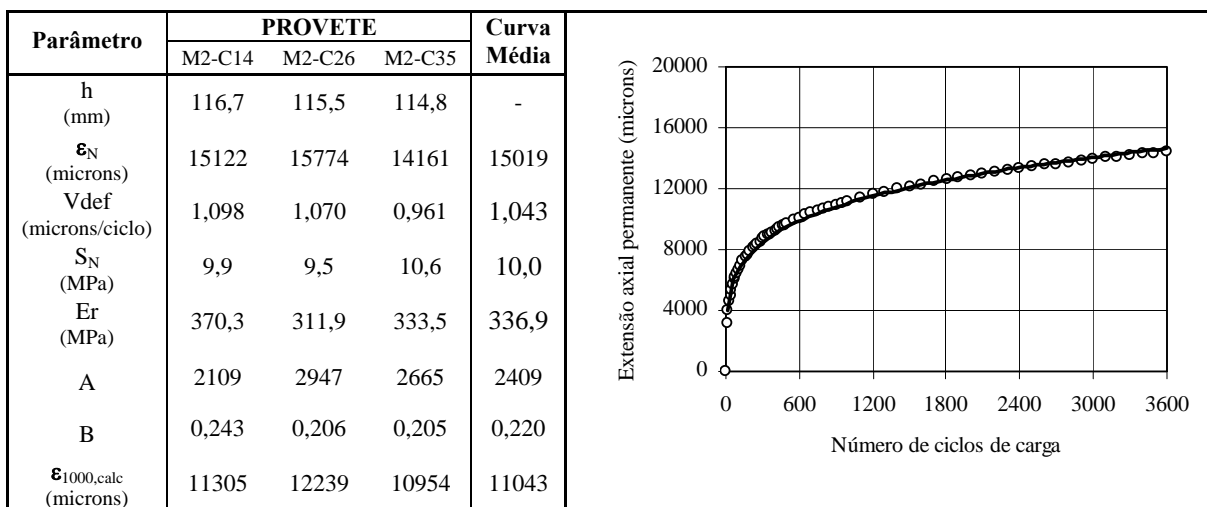


Figura III.10 – Curvas de deformação permanente da mistura M2 e respectivos parâmetros

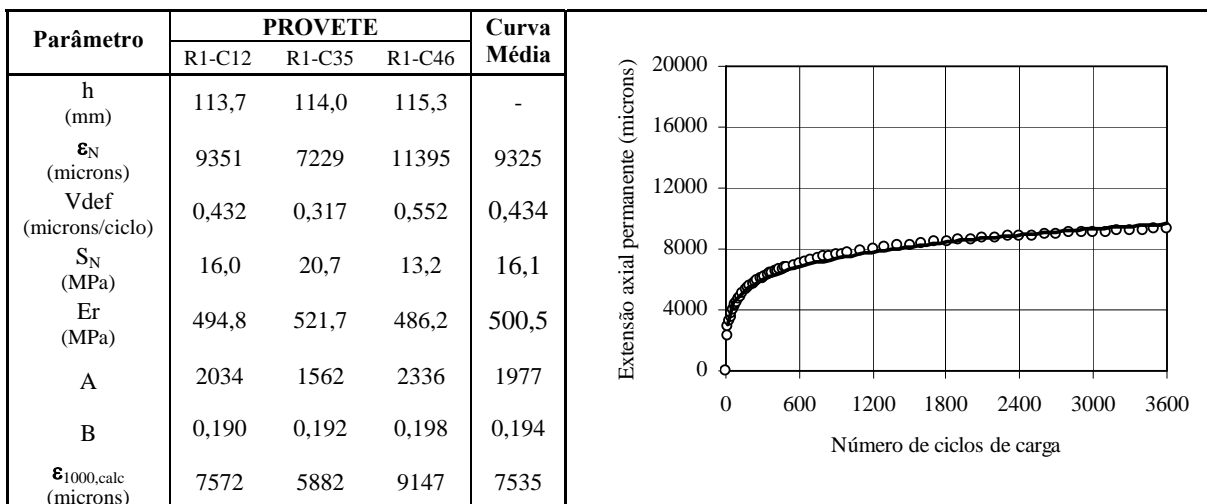


Figura III.11 – Curvas de deformação permanente da mistura R1 e respectivos parâmetros

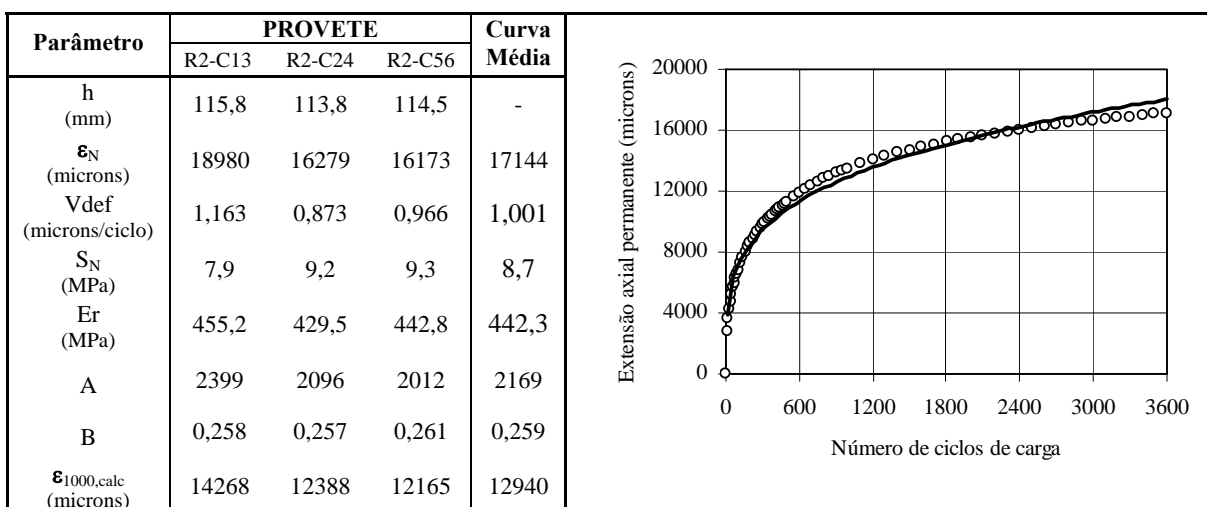


Figura III.12 – Curvas de deformação permanente da mistura R2 e respectivos parâmetros

Quadro III.14 – Resumo dos resultados obtidos nos ensaios de compressão uniaxial cíclicos sobre as misturas de betão betuminoso produzidas e compactadas em laboratório

Mistura	ϵ_{3600} (microns)	Vdef (mm/ciclo)	S_N (MPa)	E_r (MPa)	A	B	$\epsilon_{1000,calc}$ (microns)
M1	13151	0,795	11,4	297,4	2269	0,211	9773
M2	15019	1,043	10,0	336,9	2409	0,220	11043
R1	9325	0,434	16,1	500,5	1977	0,194	7535
R2	17144	1,001	8,7	442,3	2169	0,259	12940

