



**LUÍS FRANCISCO
AMARAL DA SILVA**

**CAMADAS DE DESGASTE BETUMINOSAS COM
ADIÇÃO DE BORRACHA POR VIA SECA -
AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À REFLEXÃO DE
FENDILHAMENTO**



**LUÍS FRANCISCO
AMARAL DA SILVA**

**CAMADAS DE DESGASTE BETUMINOSAS COM
ADIÇÃO DE BORRACHA POR VIA SECA -
AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À REFLEXÃO DE
FENDILHAMENTO**

Tese apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil, realizada sob a orientação científica do Doutor Agostinho António Rocha Correia e Almeida da Benta, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro, e do Doutor Luís Guilherme de Picado Santos, Professor Catedrático do Departamento de Engenharia Civil, Arquitetura e Georrecursos do Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa

Apoio financeiro da FCT e do POPH/FSE no âmbito do Quadro de Referência Estratégico Nacional Portugal 2007.2013. SFRH/BD/79151/2011



Pelo incansável apoio, dedico este trabalho à minha esposa, Andreia, e aos meus pais, Fernando e Lurdes.

o júri

Presidente

Doutor Domingos Moreira Cardoso
professor catedrático da Universidade de Aveiro

Doutor Paulo Barreto Cachim
professor associado com agregação da Universidade de Aveiro

Doutor Silvino Dias Capitão
professor coordenador do Instituto Superior de Engenharia de Coimbra

Doutora Maria de Lurdes Baptista da Costa Antunes
investigadora coordenadora do Laboratório Nacional de Engenharia Civil

Doutor José Manuel Coelho das Neves
professor auxiliar do Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa

Doutor Agostinho António Rocha Correia e Almeida da Benta
professor auxiliar da Universidade de Aveiro

agradecimentos

Aos meus orientadores, o Prof. Doutor Agostinho António Rocha Correia e Almeida da Benta e Professor Doutor Luís Guilherme de Picado Santos, por terem criado condições para que se realizasse este trabalho, estando sempre presentes em todos os momentos mais difíceis.

Ao Laboratório de Vias de Comunicação do Departamento de Engenharia Civil, Arquitetura e Georrecursos do Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa, em especial ao Geólogo Rui Garcia e ao Engenheiro João Crucho por terem dado apoio em parte dos trabalhos laboratoriais deste doutoramento.

Às empresas Irmãos Cavaco, Cepsa, Biosafe e Eurocálcio, pela disponibilidade em facilitar o fornecimento dos materiais necessários para este trabalho.

A todos aqueles que de alguma forma contribuíram para a concretização deste trabalho.

palavras-chave

Misturas betuminosas, misturas betuminosas com borracha, via seca, fadiga, deformação permanente, fendilhamento.

resumo

A incorporação de borracha granulada em misturas betuminosas pode ser feita através do processo húmido e do processo seco. No processo húmido, a borracha granulada é adicionada ao betume convencional produzindo um “novo tipo de betume” denominado betume-borracha (BMB). No processo a seco, as partículas de borracha (normalmente 1% a 3% por massa do agregado total na mistura) são utilizadas, geralmente, em substituição de parte dos agregados finos. O processo de fabrico por via seca que utiliza partículas de borracha de dimensões ultrafinas (como no processo por via húmida, diâmetro nominal inferior a 0,8 mm) produz misturas betuminosas descontínuas com qualidade similar às produzidas por via húmida. Os resultados deste trabalho corroboram o melhor comportamento de misturas betuminosas com borracha, adicionada por via seca, quando comparadas com misturas betuminosas convencionais. São avaliados o comportamento à fadiga, o comportamento à deformação permanente e a resistência ao fendilhamento das misturas betuminosas com e sem borracha. A resistência à fadiga das misturas betuminosas é avaliada através de ensaios de flexão em quatro pontos em vigas. Para verificar o comportamento à deformação permanente das mesmas misturas são realizados ensaios com simulador de tráfego. A avaliação da resistência ao fendilhamento recorre á execução de fendas induzidas em vigas e em lajes retangulares.

keywords

Bituminous mixtures, asphalt rubber, dry process, fatigue, rutting, cracks.

Abstract

The incorporation of granulated rubber in asphalt mixtures can be made by a wet process or by a dry process. In the wet process the granulated rubber, added to the conventional bitumen, produces a "new kind of bitumen" called bitumen rubber. In the dry process, the rubber particles (typically 1% to 3% by weight of the total aggregate in the mixture) are used, generally, as a substitute for a small part of the fine aggregate. The dry process using ultra-thin rubber particles (such as the wet process), below 0.8 mm nominal diameter, leads to discontinuous mixtures with similar quality of those produced by the wet process. The results of this work corroborates the best performance of bituminous mixtures with added rubber by dry process when compared to conventional blends. Resistance to cracking propagation, fatigue resistance, and rut resistance are tested. Four-point bending tests on beams are used to infer about fatigue resistance. Wheel tracking tests on rectangular slabs are used to infer about rut resistance. The resistance to cracking is evaluated executing induced cracks on beams and rectangular slabs.

Índice

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Enquadramento	1
1.2	Objetivos e Metodologia	2
1.3	Estrutura do Trabalho	2
2	MISTURAS BETUMINOSAS COM ADIÇÃO DE BORRACHA.....	5
2.1	Enquadramento	5
2.2	Obtenção do Granulado de Borracha	6
2.2.1	Trituração Criogénica	10
2.2.2	Trituração Mecânica à Temperatura Ambiente	11
2.3	Betumes Modificados com Borracha Reciclada de Pneus	14
2.3.1	Granulado de Borracha, em Misturas Betuminosas, no Mundo.....	14
2.3.2	Interação Betume-Borracha	15
2.3.3	Obtenção do Betume-Borracha	18
2.4	Misturas Betuminosas com Borracha Adicionada por Via Húmida	20
2.5	Misturas Betuminosas com Borracha Adicionada por Via Seca.....	30
2.6	Comparação do Desempenho no Processo Seco e no Processo Húmido.....	51
3	MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO EMPÍRICO-MECANICISTA DA AASHTO	55
3.1	Enquadramento	55

3.2	Descrição do MEPDG	55
3.2.1	Processo de Dimensionamento.....	56
3.2.2	Critérios de Dimensionamento.....	58
3.2.3	Parâmetros de Entrada do Dimensionamento	58
3.2.4	Modelos de Resposta do Pavimento.....	61
3.2.5	Modelos Empíricos de Desempenho.....	63
3.2.6	Fator de Segurança	65
4	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL E RESULTADOS.....	67
4.1	Enquadramento	67
4.2	Procedimento Experimental.....	68
4.3	Materiais Utilizados.....	69
4.3.1	Betume	69
4.3.2	Granulado de Borracha.....	70
4.3.3	Interação Física entre o Betume e a Borracha.....	72
4.3.4	Agregados.....	72
4.4	Formulação das Misturas Betuminosas.....	78
4.4.1	Características <i>Marshall</i>	78
4.4.2	Sensibilidade à água – ITSR	82
4.5	Desempenho Estrutural das Misturas Betuminosas	90
4.5.1	Comportamento à Deformação Permanente	90
4.5.2	Comportamento à Fadiga	102

4.6	Desempenho Estrutural na Presença de Fendas	129
4.6.1	Fadiga com Fenda Induzida.....	129
4.6.2	Deformação Permanente com Fenda Induzida	139
5	CONCLUSÕES.....	149
5.1	Trabalho Realizado.....	149
5.2	Principais Inferências e Orientações de Aplicação	149
5.3	Trabalhos Futuros	152
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	155

Índice de Figuras

Figura 2.1 – Processo por via húmida, adaptado de Hassan et al. (2014).....	5
Figura 2.2 - Processo por via seca, adaptado de Hassan, et al. (2014).....	6
Figura 2.3 – Constituição de um pneu, adaptado de Steelmate (2016).....	7
Figura 2.4 – Diferentes tamanhos de granulado de borracha, ReRUBBER (2015).....	9
Figura 2.5 - Produção do granulado de borracha pelo processo criogénico, adaptado de Feiteira (2011).....	11
Figura 2.6 – Método de trituração mecânica à temperatura ambiente, adaptado de Reschner (2008).....	12
Figura 2.7 – Observação ao microscópio ótico do granulado de borracha, adaptado de Feiteira Dias & Picado-Santos (2008).....	13
Figura 2.8 – Aumento de volume da borracha no processo de interação betume-borracha, Hassan, et al. (2014).....	15
Figura 2.9 – Sistema <i>McDonald</i> , adaptado de Presti (2013).....	19
Figura 2.10 – Unidade móvel de produção de betume-borracha, adaptado de Presti (2013).....	20
Figura 2.11 – Curvas de fadiga, Fontes et al. (2007).....	23
Figura 2.12 – N.º de eixos padrão de 80 kN que originam uma rodeira de 12,7 mm nas misturas a 60 °C, Fontes et al. (2007).....	24
Figura 2.13 - Resistência à fadiga das misturas betuminosas com betume-borracha, adaptado de Batista et al. (2006).....	25
Figura 2.14 - Evolução da rodeira com o tempo para as misturas betuminosas com betume-borracha, adaptado de Batista et al. (2006).....	26
Figura 2.15 - Variação média do volume de vazios das misturas em estudo no ensaio de compactabilidade, Silva et al. (2014).....	27
Figura 2.16 - Variação do módulo de rigidez e do ângulo de fase das misturas betuminosas em função da frequência de aplicação de carga, Silva et al. (2014).....	28

Figura 2.17 - Resultados do ensaio de fadiga e correspondentes leis de fadiga das misturas estudadas, Silva et al. (2014)	28
Figura 2.18 – Resultados do ensaio de deformação permanente às misturas betuminosas estudadas, adaptado de Silva et al. (2014)	29
Figura 2.19 – Avaliação da sensibilidade à água, adaptado de Moreno et al. (2012)	37
Figura 2.20 – Avaliação da deformação permanente, adaptado de Moreno et al. (2012)	38
Figura 2.21 – Observação, ao microscópio de fluorescência, de amostras de: (a) betume e agregados; (b) betume e borracha, antes da digestão; (c) betume e borracha, decorrido o tempo de digestão de 2h. Adaptado de López-Moro et al. (2013)	42
Figura 2.22 – Observação, ao microscópio eletrônico de varrimento, da mistura betuminosa com borracha, adaptado de López-Moro et al. (2013). (a) Tempo de digestão de 2 h. (b) Sem tempo de digestão. (c) Tempo de digestão de 2 h e partículas de borracha maiores (0,55 mm).....	43
Figura 2.23 – Linhas de fadiga a 20°C e a 30°C, adaptado de Feiteira-Dias et al. (2014).....	46
Figura 2.24 – Curvas do ensaio <i>Wheel Tracking</i> , adaptado de Feiteira-Dias et al. (2014)	46
Figura 2.25 – Distribuição do granulado de borracha nos provetes, adaptado de Hassan et al. (2015)	49
Figura 2.26 – Imagens Raios X dos provetes das misturas betuminosas, à altura de 35 mm, adaptado de Hassan et al. (2015)	49
Figura 2.27 – Distribuição de vazios nos provetes, mostrada a vermelho pelas Imagens Raios X, adaptado de Hassan et al. (2015).....	50
Figura 2.28 – Comparação dos módulos de deformabilidade das misturas obtidas pelo método seco e pelo método húmido, Feiteira Dias et al. (2014)	52
Figura 2.29 – Comportamento à fadiga das misturas obtidas pelo método seco e pelo método húmido, Feiteira Dias et al. (2014).....	52
Figura 2.30 - Comportamento à deformação permanente das misturas obtidas pelo método seco e pelo método húmido, Feiteira Dias et al. (2014)	53
Figura 4.1 – Curva granulométrica do granulado de borracha	72

Figura 4.2 – Curva granulométrica da mistura MBR-BA	77
Figura 4.3 – Curva granulométrica da mistura AC14 Surf	78
Figura 4.4 – Ensaio <i>Marshall</i>	79
Figura 4.5 - Provetes resultantes do ensaio ITSR à mistura MBR-BA. Vista geral dos provetes ensaiados (a), vista da área de rotura de um provete (b)	87
Figura 4.6 - Provetes resultantes do ensaio ITSR à mistura AC14 Surf. Vista geral dos provetes ensaiados (a), vista da área de rotura de um provete (b)	90
Figura 4.7 - Ensaios utilizados para avaliação da resistência à deformação permanente das misturas betuminosas, Capitão (2003).....	92
Figura 4.8 – Execução das lajes betuminosas	94
Figura 4.9 – Rodeira em lajes da mistura MBR-BA	98
Figura 4.10 – Rodeira em lajes da mistura AC14 Surf	101
Figura 4.11 – Deformação permanente para as percentagens ótimas em betume	102
Figura 4.12 - Evolução típica da tensão, da extensão e do módulo de deformabilidade, em ensaios de fadiga em extensão controlada e em tensão controlada, Baptista (2006).....	104
Figura 4.13 – Unidade de flexão do ensaio de flexão em quatro pontos.....	106
Figura 4.14 – Esquema do ensaio à flexão em quatro pontos, adaptado CEN (2004a)	107
Figura 4.15 – Controlo (a), aquisição de dados (b) e reservatório de ar comprimido (c)	111
Figura 4.16 – Unidade de flexão (a) e câmara climática (b)	112
Figura 4.17 – Esquema da aplicação do carregamento sinusoidal, adaptado de Crucho (2011)....	112
Figura 4.18 – Misturador <i>Controls BITUMIX</i>	113
Figura 4.19 – Molde da laje com a mistura betuminosa compactada	113
Figura 4.20 – Equipamento de compactação <i>Roller Compactor</i>	114
Figura 4.21 – Laje betuminosa antes e depois do corte em provetes	114

Figura 4.22 – Módulo de deformabilidade das vigas da mistura MBR-BA à temperatura de 20°C (8% de betume).....	118
Figura 4.23 – Módulo de deformabilidade das vigas da mistura AC14 Surf à temperatura de 20°C (5% de betume).....	121
Figura 4.24 – Módulo de deformabilidade das vigas das misturas AC14 Surf e MBR-BA à temperatura de 20°C	122
Figura 4.25 – Ângulo de Fase médio das vigas das misturas AC14 Surf e MBR-BA à temperatura de 20°C.....	123
Figura 4.26 – Comportamento à fadiga das vigas das misturas AC14 Surf e MBR-BA	128
Figura 4.27 – Provette betuminoso com fenda induzida	130
Figura 4.28 – Condições de carregamento e de apoio do modelo de elementos finitos.....	131
Figura 4.29 – Máxima tensão de tração na base do provete do modelo de elementos finitos.....	133
Figura 4.30– Módulo de deformabilidade das vigas com fenda induzida, à temperatura de 20°C	135
Figura 4.31 – Ângulo de fase médio das vigas com fenda induzida, à temperatura de 20°C.....	135
Figura 4.32 – Andamento do ensaio de fadiga aos provetes com fenda induzida.....	136
Figura 4.33 – Pintura da viga	137
Figura 4.34 – Número de ciclos para diferentes critérios de paragem (50% e 20%)	137
Figura 4.35 – Fotografias da zona fendilhada de alguns provetes MBR-BA.....	139
Figura 4.36 – Fotografias da zona fendilhada de alguns provetes AC14 Surf	139
Figura 4.37 – Disposição das lajes no ensaio de deformação permanente com fenda induzida	140
Figura 4.38 – Disposição das lajes coladas	141
Figura 4.39 – Suporte das lajes modeladas (solo fundação e ABGE).....	143
Figura 4.40 – Suporte das lajes modeladas (membranas neoprene).....	144
Figura 4.41 – Resultados da modelação dos diferentes suportes das lajes betuminosas.....	144

Figura 4.42 – Deformação excessiva nas lajes a 60°C	145
Figura 4.43 – Deformação permanente à temperatura de 20°C.....	146
Figura 4.44 – Deformação permanente à temperatura de 40°C.....	147

Índice de Quadros

Quadro 2.1 – Composição dos pneus dos veículos ligeiros e dos camiões, Shulman (2000)	8
Quadro 2.2 – Requisitos dos fusos granulométricos para camada de desgaste, EP (2014).....	22
Quadro 2.3 – Resultados do ensaio de sensibilidade à água às misturas em estudo, Silva et al. (2014)	30
Quadro 2.4 – Granulometria da borracha das misturas betuminosas FHWA (1998).....	33
Quadro 2.5 – Parâmetros de fadiga e de deformação permanente a 20°C e a 10Hz, López-Moro, et al. (2013)	44
Quadro 2.6 – Curvas granulométricas dos agregados e do granulado de borracha (percentagem, em massa, de passado acumulado), Feiteira-Dias et al. (2014).....	45
Quadro 2.7 – Composições e temperaturas de fabrico das misturas betuminosas, Feiteira-Dias et al. (2014)	45
Quadro 2.8 – Variação da profundidade de rodeira ($R_{rd-105/120}$) e profundidade de rodeira total (R_{d-120}), Feiteira-Dias et al. (2014)	47
Quadro 2.9 – Características gerais das misturas betuminosas com borracha adicionada por via húmida, Feiteira Dias et al. (2014).....	51
Quadro 4.1 – Especificações do betume de penetração nominal 35/50	70
Quadro 4.2 – Penetração a 25°C e temperatura de amolecimento do betume de penetração nominal 35/50.....	70
Quadro 4.3 – Características físicas do granulado de borracha.....	71
Quadro 4.4 – Propriedades dos agregados	73
Quadro 4.5 – Curva granulométrica da brita 8/20.....	74
Quadro 4.6 – Curva granulométrica da brita 4/12.....	74
Quadro 4.7 – Curva granulométrica da Brita 4/10	75
Quadro 4.8 – Curva granulométrica da Brita 0/4 (pó de pedra).....	75

Quadro 4.9 – Curva granulométrica do filer	76
Quadro 4.10 – Análise granulométrica da mistura MBR-BA	76
Quadro 4.11 – Análise granulométrica da mistura AC14 Surf.....	77
Quadro 4.12 – Características <i>Marshall</i> da mistura MBR-BA	81
Quadro 4.13 – Características <i>Marshall</i> da mistura AC14 Surf.....	82
Quadro 4.14 – Baridade dos provetes da mistura MBR-BA (ensaio ITSR).....	85
Quadro 4.15 – Resultados ITSR da mistura MBR-BA	86
Quadro 4.16 – Baridade dos provetes da mistura AC14 Surf (ensaio ITSR).....	88
Quadro 4.17 – Resultados ITSR da mistura AC14 Surf.....	89
Quadro 4.18 – Espessura das lajes para dispositivos de pequeno porte (procedimento B).....	94
Quadro 4.19 – Caracterização geométrica das lajes da mistura MBR-BA	95
Quadro 4.20 – Resultados do ensaio <i>Wheel Tracking</i> à mistura MBR-BA	96
Quadro 4.21 – Resumo dos resultados do ensaio <i>Wheel Tracking</i> à mistura MBR-BA	97
Quadro 4.22 – Caracterização geométrica das lajes da mistura AC14 Surf.....	98
Quadro 4.23 – Resultados do ensaio <i>Wheel Tracking</i> à mistura AC14 Surf.....	99
Quadro 4.24 – Resumo dos resultados do ensaio <i>Wheel Tracking</i> à mistura AC14 Surf.....	100
Quadro 4.25 – Resultados do ensaio <i>Wheel Tracking</i> para as percentagens ótimas em betume....	101
Quadro 4.26 – Tipos de ensaios de fadiga, adaptado de (CEN 2004b).....	105
Quadro 4.27 – Caracterização geométrica das vigas da mistura MBR-BA (8% de betume).....	116
Quadro 4.28 – Média, desvio padrão e coeficiente de variação da baridade, da porosidade e do VMA das vigas da mistura MBR-BA.....	117
Quadro 4.29 – Caracterização geométrica das vigas da mistura AC14 Surf (5% de betume)	119

Quadro 4.30 – Média, desvio padrão e coeficiente de variação da baridade, da porosidade e do VMA das vigas da mistura AC14 Surf.....	120
Quadro 4.31 – Comparação do módulo de deformabilidade dos provetes da mistura MBR-BA ..	124
Quadro 4.32 – Comparação do módulo de deformabilidade dos provetes da mistura AC14 Surf.	125
Quadro 4.33 – Comportamento à fadiga das vigas da mistura MBR-BA (8% de betume).....	126
Quadro 4.34 – Comportamento à fadiga das vigas da mistura AC14 Surf (5% de betume).....	127
Quadro 4.35 – Resultados complementares da linha de fadiga.....	129
Quadro 4.36 – Output do modelo de elementos finitos.....	132
Quadro 4.37 – Caracterização geométrica das vigas com fenda induzida da mistura MBR-BA ...	133
Quadro 4.38 – Caracterização geométrica das vigas com fenda induzida da mistura AC14 Surf .	133
Quadro 4.39 – Média, desvio padrão e coeficiente de variação da baridade, da porosidade e do VMA das vigas com fenda induzida.....	134
Quadro 4.40 - Propriedades da borracha de Neoprene.....	142
Quadro 4.41 – Disposição dos conjuntos de lajes ensaiados.....	145
Quadro 4.42 – Caracterização geométrica dos conjuntos de lajes ensaiados.....	146
Quadro 4.43 – Resultados do ensaio <i>Wheel Tracking</i> para diferentes combinações de lajes	147

Abreviaturas, Símbolos e Unidades

Abreviaturas

2PB-PR – ensaio de flexão em dois pontos em provete prismático retangular

2PB-TR – ensaio de flexão em dois pontos em provete prismático trapezoidal

3PB-PR – ensaio de flexão em três pontos em provete prismático retangular

4PB-PR – ensaio de flexão em quatro pontos em provete prismático retangular

AASHTO – *American Association of State Highway and Transportation Officials*

AC14 – mistura betuminosa densa

AC14 Surf – mistura betuminosa sem borracha

APA – *Asphalt Pavement Analyzer*

BBA – alta percentagem de borracha

BBM – média percentagem de borracha

BMB – betume-borracha

Brita 0/4 – agregados minerais britados de tamanho nominal inferior a 4,0 mm

Brita 4/10 – agregados minerais britados de tamanho nominal entre 4,0 e 10,0 mm

Brita 4/12 – agregados minerais britados de tamanho nominal entre 4,0 e 12,0 mm

Brita 8/20 – agregados minerais britados de tamanho nominal entre 8,0 e 20,0 mm

CBR – *California Bearing Ratio*

CEDEX – Centro de Estudos e Experimentação das Obras Públicas de Madrid

CET EP – caderno de encargos tipo obra das Estradas de Portugal

CRREL – *US Army Corps of Engineers Cold Region Research Engineering Laboratory*

CRT – *Cooper Research Technology*

CT – tomografia computadorizada

DSR – reómetro de corte dinâmico

EICM – *Enhanced Integrated Climate Model*

ERSA – *Evaluator of Rutting and Stripping in Asphalt*

ETRMA – *European Tyre and Rubber Manufacturers Association*

FEM – *Finite Element Method*

FHWA – *Federal Highway Administration*

FWTT – *French Wheel Tracking Tester*

GLWT – *Georgia Loaded Wheel Tester*

HWTD – *Hamburg Wheel Tracking Device*

ICM – *Integrated Climatic Model*

IST – Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa

IT-CY – ensaio de tração indireta ou compressão diametral em provete cilíndrico

ITSR – resistência conservada em tração indireta

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

LTTP – *Long Term Pavement Performance*

LVCT – Laboratório de Vias de Comunicação e Transportes

LVDT – *Linear Variable Differential Transformer*

MBA – misturas betuminosas abertas

MB_F – classificação do valor de Azul de Metileno

MBR – mistura betuminosa rugosa

MBR-BA – mistura betuminosa rugosa com alta percentagem de borracha adicionada por via seca

MBR-BBA – mistura betuminosa rugosa com betume modificado com alta percentagem de borracha adicionada por via húmida

MEPDG – *Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide*

MLET – *Multi Layer Linear Elastic Theory*

NCHRP – *National Cooperative Highway Research Program*

NFU – *Neumáticos Fuera de Uso*

RTDs – *Resistance Temperature Detector*

RUMAC – *Rubber Modified Hot-Mix Asphalt Concrete*

SAM – *Stress Absorbing Membrane*

SAMI-R – *Stress-absorbing membrane interlayer-Rubber*

SBR – borracha de estireno-butadieno

SHRP – *Strategic Highway Research Program*

SMA14 – mistura betuminosa descontínua

STFs – *Slab Testing Facilities*

Símbolos: Alfabeto Latino

% – percentagem

A₀ – estimativa do nível de carregamento, Q

A₁ – estimativa da inclinação da linha de fadiga

E – módulo de deformabilidade

E₁ – componente elástica ou real do módulo complexo

E₂ – componente imaginária do módulo complexo

E_b – módulo de compressibilidade

E* – módulo de deformabilidade dinâmico

f – frequência

FI – classificação do Índice de Achatamento

i – número do provete

ITS_d – resistências à tração indireta dos provetes “a seco”

ITS_w – resistência à tração indireta dos provetes imersos

j – critério de rotura escolhido

k – conjunto das condições de ensaio

LA – classificação do coeficiente de *Los Angeles*

M_{DE} – classificação do coeficiente micro-Deval

MI – material impermeável

N – número de ciclos

N_{i,j,k} – duração da vida à fadiga da mistura betuminosa para o critério de rotura escolhido, j, e para o conjunto de condições de ensaio, k

PRD_{AIR} – média proporcional da profundidade da rodeira

PS – partículas secas

PSt – partículas saturadas com superfície seca

RD – profundidade de rodeira em cada subcamada

R_{d-120} – profundidade de rodeira total após 120 minutos

RD_{AIR} – profundidade média da rodeira

RD_{Base} – profundidade de rodeira na base

$RD_{Fundação}$ – profundidade de rodeira na fundação

RD_{MB} – profundidade de rodeira na camada betuminosa

RD_{total} – deformação permanente total

$R_{rd-105/120}$ – variação da profundidade de rodeira

t_i – intervalo de tempo entre um ciclo de carregamento e um ciclo de deslocamento

t_p – duração dum ciclo de carregamento

$V_{105/120}$ – velocidade de deformação

VMA – volume de vazios no esqueleto do agregado

WTS_{AIR} – média da variação da deformação permanente ao ar

Símbolos: Alfabeto Grego

ΔF – amplitude da carga

$\Delta \delta$ – amplitude do deslocamento

ϵ_6 – nível de extensão para o qual o número de ciclos necessário para se atingir a rotura é 1000000

ϵ_i – amplitude inicial de extensão medida no 100º ciclo de carga

ν – coeficiente de Poisson

ϕ – ângulo de fase

Unidades

μm – micrómetro

cm – centímetro

cm³ – centímetro cúbico

Hz – hertz

kg – quilograma

km – quilómetro

kN – quilonewton

kPa – quilopascal

m – metro

m³ – metro cúbico

Mg – megagrama

mm – milímetro

MPa – megapascal

N – newton

°C – grau Celcius

Pa – pascal

s – segundo

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

O estudo do comportamento das misturas betuminosas com a adição de borracha por via seca assume-se como uma necessidade da atualidade porque estas têm um processo de fabrico muito mais barato e menos complexo que as fabricadas por via húmida, e potencialmente (Picado-Santos & Feiteira Dias 2009) podem constituir uma alternativa vantajosa não só às misturas produzidas por via húmida como principalmente às tradicionais, nomeadamente para estradas de médio a baixo tráfego.

A incorporação de borracha granulada em misturas betuminosas pode ser feita através do processo húmido (*wet process*) e do processo seco (*dry process*). No processo húmido, a borracha granulada é adicionada ao betume convencional produzindo um “novo tipo de betume” denominado betume-borracha (BMB). A incorporação de borracha no processo húmido pode ser feita através do sistema *continuous blend* (mistura do betume e da borracha em tanques especiais na própria central) ou através do sistema *terminal blend* (mistura do betume e da borracha realizada previamente em unidades industriais, com possibilidade de armazenamento do betume-borracha). No processo a seco, as partículas de borracha (normalmente 1% a 3% por massa do agregado total na mistura) são, geralmente, utilizadas em substituição de parte dos agregados finos da mistura betuminosa (Heitzman 1992; Fontes 2009).

Pesquisas anteriores (Feiteira Dias & Picado-Santos 2009; Feiteira Dias et al. 2014) indicam que o processo de fabrico por via seca que utiliza partículas de borracha de dimensões ultrafinas (como no processo por via húmida, diâmetro nominal inferior a 0,8 mm) produz misturas betuminosas descontínuas com qualidade similar às produzidas por via húmida.

1.2 Objetivos e Metodologia

Este trabalho visa, perante condições de suporte mais adversas (por exemplo, camadas betuminosas fendilhadas) comprovar o melhor comportamento das misturas betuminosas com borracha, adicionada por via seca, quando comparadas com misturas betuminosas convencionais. É avaliado o comportamento à fadiga, o comportamento à deformação permanente e a evolução da propagação de fendas das misturas betuminosas com e sem borracha.

A resistência à fadiga das misturas betuminosas é avaliada através de ensaios de flexão em quatro pontos em vigas. Para avaliar o comportamento à deformação permanente das misturas são realizados ensaios com simulador de tráfego (Wheel Tracking). A avaliação resistência ao fendilhamento e da propagação de fendas recorre à execução de fendas induzidas em vigas (ensaio de fadiga) e em lajes retangulares (Ensaio *Wheel Tracking*).

1.3 Estrutura do Trabalho

Numa primeira fase deste trabalho, no capítulo 2, é efetuada uma descrição das várias metodologias de introdução de borracha nas misturas betuminosas. Apresentam-se as metodologias de obtenção do granulado de borracha, que pode ser obtido através de trituração criogénica ou através de trituração mecânica à temperatura ambiente. Faz-se uma contextualização da utilização do granulado de borracha, em misturas betuminosas, no mundo, e apresenta-se uma descrição do processo de obtenção e de interação do betume modificado com borracha. Conhecidos os processos de modificação do betume pela borracha, apresentaram-se vários trabalhos que contribuíram para melhorar o conhecimento das misturas betuminosas com borracha adicionada, quer por via húmida, quer por via seca. Faz-se, ainda, uma comparação do desempenho entre as misturas betuminosas obtidas pelo processo seco e pelo processo húmido.

Complementarmente ao estudo de novos materiais de pavimentação, é necessário conhecer metodologias de dimensionamento que tenham em consideração, tanto as características destes novos materiais, como o seu desempenho ao longo da vida útil do pavimento. Neste sentido, no capítulo 3, faz-se uma descrição do novo método de dimensionamento empírico-mecanicista da AASHTO.

No capítulo 4 são apresentados o procedimento experimental e os resultados conseguidos com este trabalho. Após a exposição do procedimento experimental, são descritos e caracterizados os materiais utilizados, nomeadamente o betume, o granulado de borracha e os agregados. É efetuada uma avaliação das características *Marshall* das misturas betuminosas, com e sem borracha, de forma corroborar a escolha da percentagem de betume para cada tipo de mistura e avalia-se o comportamento à deformação permanente (ensaios com simulador de tráfego *Wheel Tracking*) e à fadiga (ensaios de flexão em 4 pontos) das mesmas. Ainda no capítulo 4, com o intuito de perceber como se comportam as misturas betuminosas com borracha adicionada por via seca face às misturas betuminosas sem borracha, perante condições de serviço mais exigentes, nomeadamente a presença de fendilhamento nas camadas que as suportam, é apresentada uma análise do desempenho estrutural das misturas betuminosas na presença de fendas.

Finalmente, no capítulo 5, apresentaram-se as conclusões deste trabalho. Aqui faz-se uma breve descrição do trabalho realizado, apontam-se as principais inferências e orientações de aplicação e enunciam-se os trabalhos futuros.

2 MISTURAS BETUMINOSAS COM ADIÇÃO DE BORRACHA

2.1 Enquadramento

Durante décadas o granulado de borracha, proveniente da reciclagem pneus usados, tem sido utilizado como aditivo nas misturas betuminosas. Esta utilização teve início nos anos 60 quando a borracha se tornou interessante para a indústria de pavimentação, devido às suas propriedades elásticas com potencial para melhorar a durabilidade das misturas betuminosas e o atrito do pavimento (Cong et al. 2013; Wang et al. 2013; Yin et al. 2013). A utilização do granulado de borracha nas misturas betuminosas constitui, também, uma vantagem ambiental por ajudar a escoar o material proveniente da reciclagem de pneus (Hassan et al. 2014)

O granulado de borracha pode ser utilizado, na modificação das misturas betuminosas, recorrendo a duas metodologias distintas. Numa das metodologias (Figura 2.1), a via húmida (*wet process*), são adicionadas partículas finas de borracha ao betume aquecido, produzindo um aglutinante designado por betume-borracha. Na outra metodologia (Figura 2.2), a via seca (*dry process*), partículas mais grosseiras de borracha são adicionadas à mistura em substituição de parte do agregado britado, fazendo com que a borracha funcione como um agregado elástico da mistura betuminosa (Moreno et al. 2011; Moreno et al. 2012; Moreno et al. 2013).

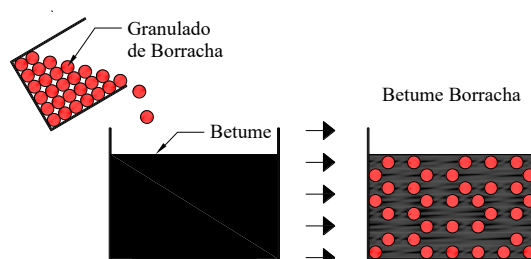


Figura 2.1 – Processo por via húmida, adaptado de Hassan et al. (2014)

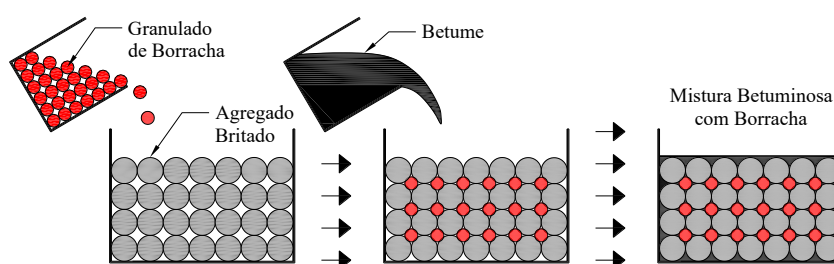


Figura 2.2 - Processo por via seca, adaptado de Hassan, et al. (2014)

2.2 Obtenção do Granulado de Borracha

A atual conjuntura económica mundial motiva a procura crescente de misturas betuminosas que incorporem materiais reciclados, não só para a construção de pavimentos rodoviários novos, mas igualmente para a reabilitação dos já existentes (Martinho et al. 2015; Martinho et al. 2013; Antunes et al. 2015; Martinho et al. 2012; Neves et al. 2013).

O aumento do número de veículos nas estradas dos países industrializados e em desenvolvimento gera, todos os anos, milhões de pneus usados. Em todo o mundo, a cada ano, são vendidos cerca de 1400 milhões de pneus e caem na categoria de pneus em fim de vida um número muito próximo deste. Na Europa são produzidos anualmente cerca de 355 milhões de pneus, um quarto da produção mundial. Adicionalmente ao problema da existência do excesso de pneus está a forma inadequada como estes são descartados ou armazenados. Estima-se que, em toda a Europa, as pilhas de pneus usados rondem os 5,5 milhões de toneladas, originando um custo de gestão anual de 600 milhões de euros (Presti 2013).

Para fazer face ao problema dos pneus usados, em 1989 na Europa, sob a orientação estratégica da associação europeia de fabricantes de pneus e de borracha - *European Tyre and Rubber Manufacturers Association* (ETRMA), foi criado um grupo dedicado à gestão dos pneus usados, constituído por especialistas dos principais fabricantes de pneus. Desde então, as taxas de recuperação de pneus usados têm aumentado gradualmente, demonstrando que a gestão destes pneus na Europa tem levado à eliminação progressiva das pilhas de pneus usados, aumentando a disponibilidade da borracha reciclada de pneus para utilização noutros fins. De entre outras possibilidades, a borracha resultante da reciclagem de pneus pode ser utilizada na produção de misturas betuminosas modificadas com borracha (Presti 2013).

Os pneus dos veículos (Figura 2.3), dos quais é obtida a borracha utilizada na produção de misturas betuminosas modificadas com borracha, são constituídos, principalmente, pela carcaça, pelos talões, pelos flancos, pelas cintas de aço e pela banda de rolamento (Feiteira Dias & Picado-Santos 2008; Fontes 2009).



Figura 2.3 – Constituição de um pneu, adaptado de Steelmate (2016)

Os materiais constituintes dos pneus são: compostos elásticos (borracha natural, borracha sintética, borracha de estireno-butadieno – SBR, polímeros, elastómeros termoplásticos e negro de fumo), têxteis e aço. Os têxteis (nylon e poliéster) e o aço formam o esqueleto estrutural do pneu, enquanto que os compostos elásticos constituem o preenchimento dos componentes do pneu como, por exemplo, o piso, os flancos, o talão, o revestimento interior e o ombro (Holleram & Reed 2000; Rahman 2004). No Quadro 2.1, apresenta-se de forma resumida a composição dos pneus dos veículos ligeiros e dos camiões na Europa (Shulman 2000).

Quadro 2.1 – Composição dos pneus dos veículos ligeiros e dos camiões, Shulman (2000)

Material	Veículo Ligeiro (%)	Camião (%)
Borracha/Elastómeros	48	45
Negro de Fumo	22	22
Metal	15	25
Têxteis	5	-
Óxido de Zinco	1	2
Enxofre	1	1
Aditivos	8	5

Em geral, os pneus possuem borracha natural e borracha sintética. A proporção do tipo de borracha varia com o tamanho e com a utilização de cada pneu. Em regra, é geralmente aceite que quanto maior for o pneu e mais agressiva for a sua solicitação, maior será a proporção de borracha natural face à borracha sintética. Desta forma, pode dizer-se que os pneus de camião possuem maior percentagem de borracha natural que os pneus de veículos ligeiros. No que respeita à incorporação de borracha nas misturas betuminosas, uma maior percentagem de borracha natural favorece a reação entre esta e o betume (Rahman 2004; Williamson & Peploe 2006).

O ciclo de vida dos pneus compreende 5 principais fases: A obtenção dos constituintes, a produção, o consumo, a recolha dos pneus usados e a gestão de resíduos. Após a recolha, os pneus usados seguem, ou para depósito em aterros, ou para recuperação. Existem três formas de recuperação dos pneus usados: a recuperação energética, onde os pneus, por terem poder calorífico idêntico ao carvão de boa qualidade, são usados como alternativa aos combustíveis fósseis; a recuperação química, onde são utilizados processamentos químicos como a pirólise, a termólise e a gaseificação (viabilidade económica ainda não validada); e a recuperação para granulado de borracha. Este último tipo de recuperação dos pneus usados envolve processos de trituração e cinzelamento realizados através da utilização de máquinas de grandes dimensões que cortam os pneus em pedaços de diferentes tamanhos. Nesta fase, após a separação dos têxteis e do aço, o granulado de borracha pode ser utilizado em várias aplicações de engenharia civil, tais como misturas betuminosas com borracha, tapetes absorventes ao choque, blocos de pavimentação e materiais de cobertura (Presti 2013).

Por causa da grande variação do tipo de pneus produzidos pelos diferentes fabricantes, é difícil avaliar a composição química do granulado de borracha proveniente dos pneus usados. No entanto, o granulado de borracha é geralmente referenciado pelo seu tamanho e

pelas composições básicas tais como a quantidade de borracha natural, de borracha sintética, de aço, de fibra e negro de fumo (Hassan et al. 2014).

Na produção de pneus, o processo de vulcanização provoca um aumento do número de ligações cruzadas na estrutura molecular da borracha, melhorando as suas propriedades de elasticidade e de resistência. Durante a vulcanização, a borracha é tratada com enxofre a temperaturas entre 140°C e 180°C, formando-se ligações cruzadas entre as moléculas de borracha e de enxofre (Nejad et al. 2012). O produto resultante torna-se incapaz de ser reamaciado por outro aquecimento. As propriedades físicas da borracha como o tipo, a quantidade, a forma e a granulometria afetam o desempenho das misturas betuminosas modificadas com borracha (Moreno et al. 2012).

O tamanho, a forma e a textura das partículas de borracha utilizadas para modificar as misturas betuminosas variam de acordo com as aplicações propostas, para que o desempenho esperado seja alcançado. Apresentam-se, na Figura 2.4, diferentes tamanhos de granulado de borracha, que variam desde os 0,063 milímetros até aos 4 milímetros (ReRUBBER 2015).



Figura 2.4 – Diferentes tamanhos de granulado de borracha, ReRUBBER (2015)

As partículas de borracha com forma irregular e superfície específica relativamente elevada são mais suscetíveis de reagir com o betume, a uma temperatura elevada, produzindo um ligante modificado. As partículas de borracha com forma cúbica com superfície específica relativamente reduzida são mais adequadas para a utilização no processo por via seca tradicional (que utiliza partículas de borracha mais grosseiras) como agregados elásticos que são facilmente integrados na mistura de agregados. Existem dois métodos principais para a obtenção do granulado de borracha a partir de pneus usados, o processo por trituração mecânica à temperatura ambiente e o processo por trituração criogénica. Ambos os métodos consistem em reduzir o tamanho dos pneus a pedaços de pequena dimensão e separar os

pedaços de aço e de fibra do granulado de borracha. O método por trituração mecânica à temperatura ambiente é o processo mais comum e mais produtivo para a obtenção do granulado de borracha. O processo por trituração criogénica é realizado a temperaturas negativas. O granulado de borracha obtido por trituração mecânica produz um aglutinante com uma viscosidade superior a qualquer outro betume modificado com a mesma quantidade de borracha obtida pelo processo criogénico (Huang et al. 2002; Hernández-Olivares et al. 2009; Thodesen et al. 2009).

2.2.1 Trituração Criogénica

Para a obtenção do granulado de borracha pelo método da trituração criogénica, os fragmentos de pneus usados são sujeitos a um arrefecimento criogénico, usando nitrogénio líquido a temperaturas negativas extremamente baixas (-87°C a -198°C), de forma a ultrapassar a temperatura de transição vítrea de todos os polímeros constituintes da borracha. Numa fase posterior, os fragmentos de pneus arrefecidos são transportados para os moinhos de martelos, com alta energia de impacto, de acordo com a granulometria desejada (Feiteira Dias 2011).

As partículas de borracha obtidas por este método têm forma regular com textura lisa e plana, e apresentam baixa superfície específica. Este tipo de borracha possui uma distribuição granulométrica extensa (Reschner 2008). A borracha proveniente do método criogénico, quando comparada com a borracha proveniente do método de trituração mecânica à temperatura ambiente, apresenta uma recuperação elástica inferior e, para além disso, as suas partículas, por possuírem uma superfície plana e lisa, reagem mais lentamente com o betume (Roberts et al. 1989; Fontes 2009).

As principais vantagens da trituração criogénica, face ao método à temperatura ambiente, são: o fácil controlo da uniformidade, do tamanho e do formato das partículas de borracha; a limpeza; a rapidez de operação; a facilidade de produção de granulado fino; uma maior facilidade na remoção do aço e dos têxteis; e o menor custo da produção das partículas mais finas de borracha. Por outro lado, na sua totalidade, devido à necessidade de utilização de nitrogénio líquido, este método apresenta custos de operação mais elevados (Reschner 2008; Fontes 2009; Presti 2013).

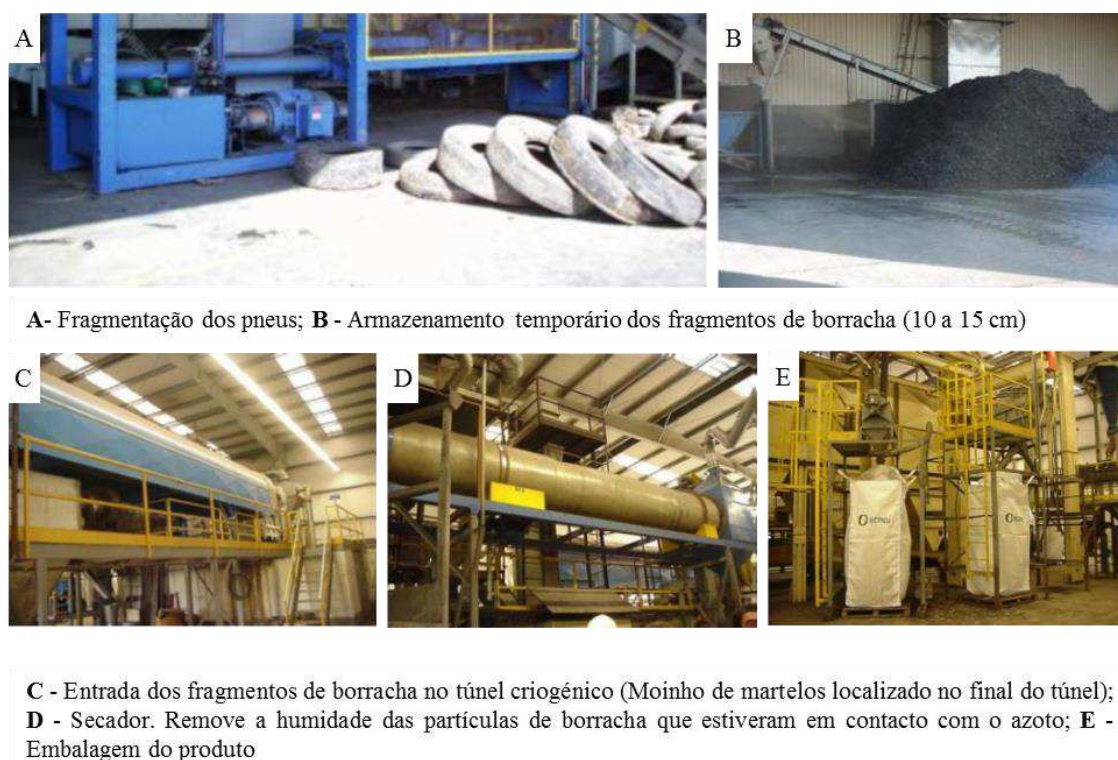


Figura 2.5 - Produção do granulado de borracha pelo processo criogénico, adaptado de Feiteira (2011)

2.2.2 Trituração Mecânica à Temperatura Ambiente

Neste método, a trituração da borracha é efetuada a temperaturas iguais ou superiores à temperatura ambiente. Este método produz partículas de borracha rasgadas, com forma irregular e com elevada superfície específica, facilitando a interação com o betume das misturas betuminosas. Este método recorre à trituração mecânica, com operações sucessivas de corte e de arrancamento, em moinhos com lâminas fixas e móveis, levando à redução da dimensão do granulado de borracha. Em ambas os métodos é efetuada a separação densimétrica dos têxteis e a separação magnética do aço, a classificação granulométrica da borracha em dimensões normalizadas, a separação de poeiras, o armazenamento em silos e embalagem (Feiteira Dias 2011; Presti 2013).

De acordo com a Figura 2.6, descrevem-se, de seguida, as várias fases do método de trituração mecânica à temperatura ambiente (Reschner 2008; Fontes 2009).

A primeira fase do processo é a redução preliminar dos pneus, na trituradora preliminar (A), em lascas de tamanhos de aproximadamente 50 mm. As lascas de pneu passam, de seguida

ao granulador (B), onde são reduzidas a tamanhos inferiores a 10 mm. Ainda nesta fase, grande parte do aço e dos têxteis ficam separadas do granulado de borracha. Após a passagem pelo granulador, o aço é removido magneticamente e os têxteis são removidos através da combinação de peneiros vibratórios e de moinhos de vento (C). O pó gerado e os têxteis são conduzidos para a remoção de pó e de têxteis (H).

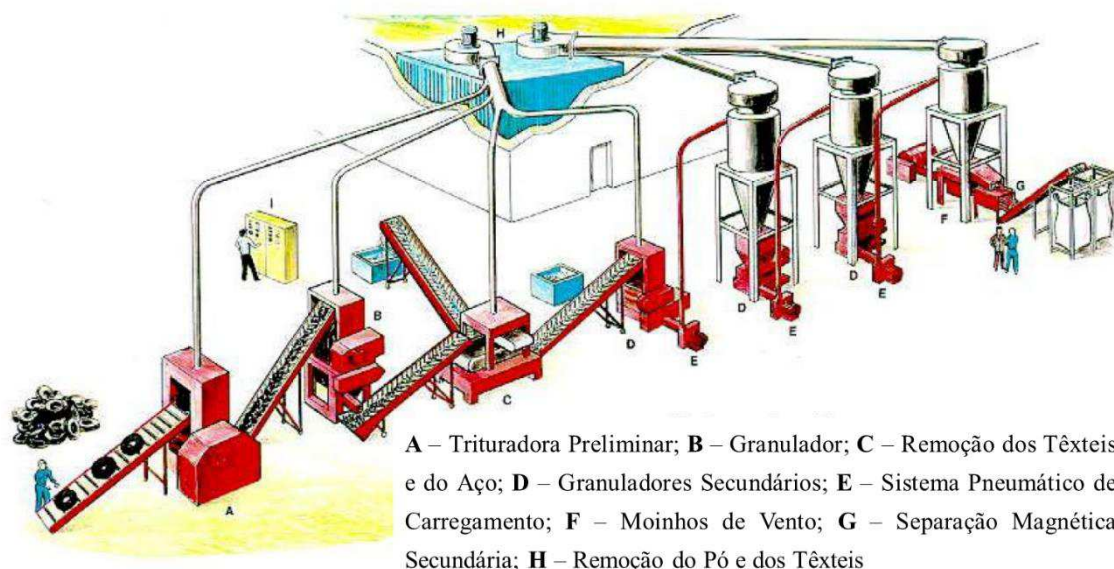


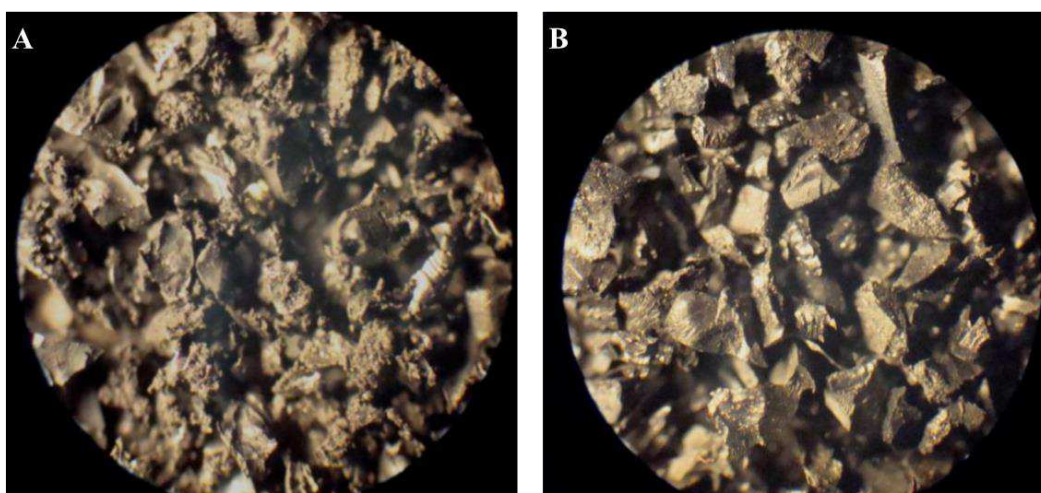
Figura 2.6 – Método de trituração mecânica à temperatura ambiente, adaptado de Reschner (2008)

Para obter granulado de borracha com tamanhos inferiores a 10 mm, são necessárias várias fases de trituração em Granuladores Secundários (D) que permitem a redução do tamanho do granulado de borracha até às dimensões desejadas. Estas fases de trituração são complementadas com o sistema pneumático de carregamento (E), com os moinhos de vento (F) e com o separador Magnético Secundário (G). No final do processo é realizada a secagem do granulado de borracha.

No método de trituração mecânica: a produção de borracha tem um custo relativamente baixo; a operação e a manutenção dos equipamentos é simples e requer pouco pessoal; e existem diversas empresas no mercado que fabricam os equipamentos e os componentes do sistema. Por outro lado, para produção de partículas de borracha extrafinas (inferiores a 0,25 mm), este método tem custos energéticos relativamente elevados. Como referido anteriormente, no que respeita à utilização da borracha nas misturas betuminosas, este

método produz partículas de borracha com elevada superfície específica que interagem mais facilmente com o betume (Fontes 2009; Presti 2013).

Nas condições portuguesas, segundo Feiteira Dias & Picado-Santos (2008), de acordo com o observado na Figura 2.7 (utilizada a mesma ampliação em A e em B), no método de trituração mecânica o granulado de borracha apresenta uma forma mais irregular e com maior superfície específica do que o granulado obtido pelo método criogénico, o qual apresenta uma forma relativamente lisa.



A – Trituração Mecânica à Temperatura Ambiente; B – Trituração Criogénica

Figura 2.7 – Observação ao microscópio óptico do granulado de borracha, adaptado de Feiteira Dias & Picado-Santos (2008)

Ainda no estudo efetuado por Feiteira Dias & Picado-Santos (2008), foi verificado que a interação física entre o betume convencional e o granulado de borracha deveria ser realizada a temperaturas inferiores à da queima da borracha (geralmente considerada como ocorrendo acima dos 175 °C), pelo que deveria ser considerado o valor limite de 170°C de forma a aproveitar todas as características que o betume modificado com borracha apresenta nas misturas betuminosas, comparativamente ao uso de betumes convencionais.

Feiteira (2011) acrescentou que o processo de trituração mecânica produziu uma borracha aparentemente mais adequada para a potenciação da ligação betume-borracha, embora nada, nas análises que efetuou, permitisse descartar a possibilidade de utilização da borracha obtida pelo processo criogénico.

2.3 Betumes Modificados com Borracha Reciclada de Pneus

Neste subcapítulo falar-se-á dos processos de obtenção do granulado de borracha de pneus usados e da sua incorporação no betume, produzindo um novo ligante designado por betume borracha.

2.3.1 Granulado de Borracha, em Misturas Betuminosas, no Mundo

Desde a invenção do processo de adição de granulado de borracha às misturas betuminosas por Charles H. McDonald, em 1963, o processo húmido tem sido usado e modificado de forma mais ampla em quatro estados dos Estados Unidos da América, nomeadamente, os estados de Arizona, Califórnia, Texas e Flórida. Mais recentemente, o processo húmido tem sido utilizado também nos estados de Carolina do Sul, Nevada e Novo México. A preferência por este tipo de modificador das misturas betuminosas tem sido devida, não só ao benefício ambiental da reciclagem dos pneus usados, mas também aos benefícios que traz às misturas betuminosas, nomeadamente a melhoria do atrito, da flexibilidade e da resistência à fadiga, e a redução do ruído do tráfego (Terrel & Walter 1986; Presti 2013).

Na África do Sul e na Austrália o betume-borracha em misturas betuminosas e em selantes começou a ser utilizado no início dos anos 80 e a meados dos anos 70, respetivamente. Na África do Sul ambos os processos seco e húmido têm sido utilizados com sucesso, com o processo seco a ser usado, principalmente, em misturas betuminosas (Visser & Verhaeghe 2000).

Na Europa (Sousa 2005; Presti 2013) o processo húmido tem sido utilizado com sucesso em misturas betuminosas desde 1981 em países como a Bélgica, a França, a Áustria, os Países Baixos, a Polónia e a Alemanha. Mais recentemente este processo tem também sido utilizado na Grécia (Mavridou et al. 2010) e no Reino Unido (Hicks et al. 2010), mas os países onde vigora com maior número de aplicações são Portugal (Antunes et al. 2000), Espanha (Gallego et al. 2000), Itália (Santagata et al. 2007), República Checa (Dasek et al. 2012) e Suécia (Nordgren A. 2012).

Em Portugal (Feiteira Dias et al. 2014) e na Espanha (Moreno et al. 2012) tem sido validadas misturas betuminosas com partículas de borracha ultrafinas adicionadas por via seca. Estas misturas têm revelado uma boa performance tanto na resistência à fadiga como na resistência à deformação permanente.

2.3.2 Interação Betume-Borracha

Um dos aspetos importantes no comportamento das misturas betuminosas com borracha é a interação entre o betume e o granulado de borracha. O termo “interação” refere-se à difusão das frações leves do betume (óleos aromáticos e maltenos) na borracha, conduzindo a um aumento de volume das partículas da mesma (Hassan et al. 2014). Este aumento de volume das partículas de borracha, como um resultado da interação betume-borracha, é mostrado, esquematicamente, na Figura 2.8.

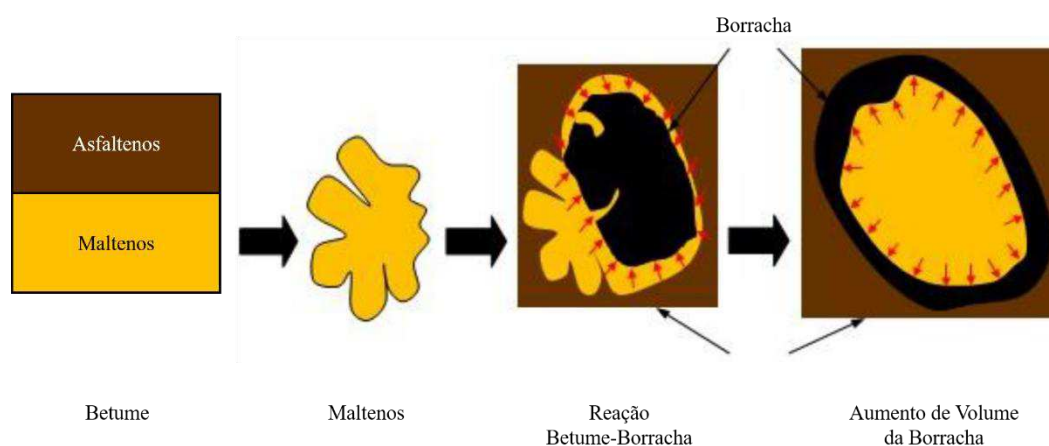


Figura 2.8 – Aumento de volume da borracha no processo de interação betume-borracha, Hassan, et al. (2014)

Quando a borracha entra em contato com o betume, a viscosidade do mesmo aumenta. Tal acontece porque, geralmente, a borracha absorve a fração de maltenos, que têm baixo peso molecular, deixando o betume residual com uma porção mais elevada de asfaltenos, que têm elevado peso molecular (Thodesen et al. 2009). A fração de maltenos difunde-se nas partículas de borracha, provocando um aumento das dimensões das partículas de borracha até se atingir um equilíbrio. Este equilíbrio é condicionado por fatores como a temperatura, o tempo de contacto entre o betume e a borracha, a composição química do betume, e o tipo e tamanho da borracha (Dong et al. 2012). Segundo Xiao et al. (2006), com calor e tempo suficientes, um maior grau de interação entre o betume e a borracha pode causar a despolimerização das partículas de borracha (processo químico de transformação de um polímero em moléculas da mesma composição quantitativa, mas de massa molecular menor). Quanto menor for o peso molecular da fração de maltenos, mais facilmente este se difundirá nas partículas de borracha (Hassan et al. 2014).

Airey, Rahman, & Collop (2003) realizaram testes de absorção de aglutinante, recorrendo ao método do cesto (*Basket Method*), para investigar a interação betume-borracha através da medição da quantidade de betume absorvida pelo granulado de borracha. Os autores verificaram que a taxa de absorção de betume e o aumento de volume da borracha são maiores para betumes com valores de penetração mais elevados (betumes ricos em óleos aromáticos). Adicionalmente, outro estudo relatou que as partículas de borracha mais pequenas, aquando da reação com o betume, poderiam aumentar de volume para cerca de três a cinco vezes do seu tamanho inicial (Leite et al. 2003; Hassan et al. 2014).

De forma geral, tem-se verificado que há um maior grau de interação betume-borracha, com propriedades melhoradas no processo húmido em relação ao processo seco, tornando assim o processo húmido o preferido para a modificação das misturas betuminosas. A interação betume-borracha, no processo húmido está bem estabelecida, pois é considerada a principal reação que ocorre no interior da mistura. No que toca ao processo seco, a interação betume-borracha está ainda pouco documentada. A maior parte da investigação realizada, relativamente ao processo a seco, geralmente assume que a reação entre a borracha e o betume na mistura é insignificante. Este pressuposto assenta na perceção de que apenas uma pequena interação pode ocorrer dentro de um intervalo de tempo de mistura limitado a elevadas temperaturas (Hassan et al. 2014).

Contrariando a tese de que a interação betume borracha é reduzida no processo seco, alguns autores determinaram que, adicionando finas partículas de borracha à mistura betuminosa, é possível alcançar uma maior modificação do aglutinante. As partículas finas de borracha têm uma maior superfície específica, tornando-se, assim, mais reativas com o betume. Consequentemente, a introdução de partículas finas de borracha, através do melhoramento das propriedades elásticas e resilientes do betume a baixas temperaturas, reduz a suscetibilidade do mesmo à temperatura (Takallou & Hicks. 1988; Xiao et al. 2006).

Para que a interação betume-borracha ocorra antes da compactação das misturas betuminosas é necessário cumprir um período de cura/ digestão da borracha mínimo. Pinheiro & Soares (2003) verificaram que sem cumprir o tempo de digestão da borracha, existe uma grande diferença entre o volume de vazios de uma mistura betuminosa com borracha adicionada por via seca e uma mistura betuminosa sem borracha. Para um período de cura superior a duas horas, apesar das misturas betuminosas apresentarem um aumento da densidade e do módulo de deformabilidade, a sua vida à fadiga sofreu uma diminuição.

Isto mostra que, garantindo um tempo de interação betume-borracha longo, sem que se ultrapasse as duas horas, é possível melhorar o desempenho das misturas betuminosas com borracha. Um dos motivos possíveis para a perda de resistência das misturas betuminosas sujeitas a períodos de cura muito longos poderá ser o facto haver uma elevada difusão dos óleos do betume nas partículas de borracha, afetando negativamente as propriedades adesivas do betume e, conseqüentemente, reduzindo a capacidade aglutinante entre o betume e os agregados. Por isto é recomendada a utilização de maior quantidade de betume, ou um betume com maior valor de penetração, nas misturas betuminosas com borracha face às misturas betuminosas convencionais (Airey et al. 2003; Xiao et al. 2006; Wang et al. 2013).

Com o intuito de perceber qual o tempo necessário para que ocorra uma eficaz interação física entre o betume e a borracha nas misturas betuminosas com borracha adicionada por via seca, Feiteira (2011) efetuou um estudo de resistência conservada através de ensaios de compressão *Marshall* a misturas betuminosas com média (10% de borracha em relação à massa total de betume) e alta (20% de borracha em relação à massa total de betume) percentagem de borracha. Neste estudo foram considerados os tempos de interação física de 0; 30; 60; 90 e 180 minutos.

Feiteira (2011) verificou que as misturas com média percentagem de borracha apresentaram um valor máximo de resistência conservada para o tempo de interação física de 60 minutos. A partir deste tempo verificou-se um decréscimo dos valores de resistência conservada. Nas misturas betuminosas com alta percentagem de borracha, Feiteira (2011) observou que, com o aumento do tempo de interação física, aumentaram os valores de resistência conservada das misturas, não sendo possível observar um valor de pico para a mesma. No entanto, os valores de resistência conservada para tempos de interação entre os 90 minutos e os 180 minutos apresentaram uma evolução muito baixa.

Para além do estudo laboratorial, Feiteira (2011) realizou 3 trechos experimentais em Messines e um trecho experimental em Avis. Destes trechos experimentais foram recolhidas lajes e vigas para estudar o comportamento mecânico das misturas betuminosas. Nos trechos de Messines o tempo de interação entre o betume e a borracha (tempo decorrido desde a produção em central até à aplicação em obra) foi de 100 minutos para a mistura com média percentagem de borracha e de 94 minutos para a mistura com alta percentagem de borracha. No trecho de Avis o tempo de interação entre o betume e a borracha foi de 160 minutos.

Do estudo laboratorial e dos trechos experimentais, Feiteira (2011) concluiu que as misturas com média e alta incorporação de borracha apresentaram um intervalo de tempo ótimo de interação entre o betume convencional e o granulado de borracha de 60 a 90 minutos (média percentagem de borracha) e de 90 a 180 minutos (alta percentagem de borracha).

Relativamente às propriedades do ligante, Feiteira (2011) verificou que o betume modificado com borracha resultante das misturas betuminosas produzidas por via seca, em relação ao betume convencional, apresentava maior valor do ponto de amolecimento, menor valor de penetração, maior resiliência e maior viscosidade.

2.3.3 Obtenção do Betume-Borracha

O termo betume-borracha é normalmente utilizado para identificar um conjunto de conceitos que envolvem a incorporação de granulado de borracha em ligantes betuminosos para aplicação em obras de pavimentação. Os principais sistemas de modificação do betume por adição de granulado de borracha são, com referido anteriormente, o sistema *Continuous Blend* e o sistema *Terminal Blend*. Apresenta-se, de seguida, uma descrição destes dois sistemas e de outros sistemas que os complementam (Presti 2013).

2.3.3.1 Sistema McDonald

Esta terminologia está relacionada com o processo original de fabrico de misturas betuminosas com borracha adicionada por via húmida, proposto por Charles McDonald na década de 1960. De acordo com a Figura 2.9, este tipo de betume-borracha é produzido num tanque onde é misturado o betume e o granulado de borracha. O ligante modificado é posteriormente mudado para um tanque de armazenamento que contém um sistema de fusos helicoidais que obrigam à circulação do ligante durante o tempo necessário para que ocorra a reação entre o betume e a borracha (geralmente 45 a 60 min). Terminado este processo, o betume-borracha está pronto para a utilização em misturas betuminosas (Presti 2013).

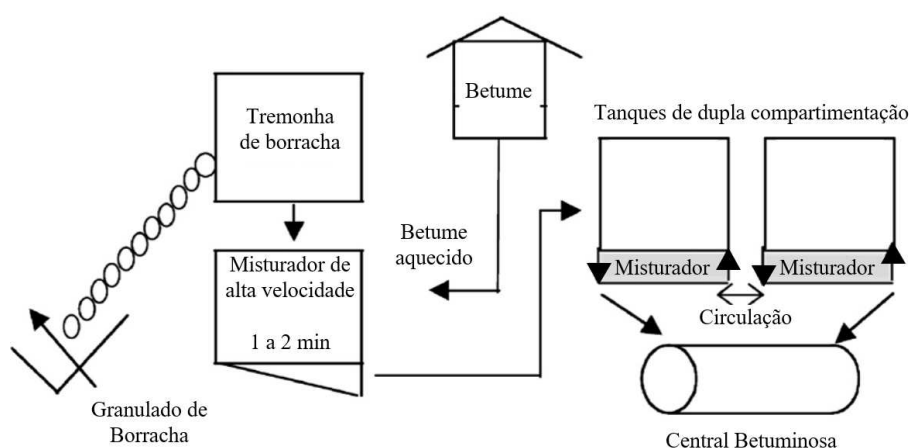


Figura 2.9 – Sistema *McDonald*, adaptado de Presti (2013)

2.3.3.2 Sistema *Continuous Blend*

Este sistema é semelhante ao sistema *McDonald*, sendo que a diferença é que a mistura da borracha com o betume é efetuada continuamente num único tanque e posteriormente armazenada em tanques para ser utilizada mais tarde. Neste caso a reação entre o betume e a borracha ocorre, durante a mistura de ambos, no mesmo tanque (Heitzman 1992). No sistema *continuous blend*, o betume-borracha deve ser utilizado até quatro horas após a sua produção (Fontes 2009).

2.3.3.3 Sistema *Field Blend*

O betume-borracha pode ser produzido nas centrais de fabrico de misturas betuminosas através da incorporação de algumas modificações das mesmas. Por esta razão o betume-borracha pode ser identificado como misturado em campo – *field blend*. As modificações nas centrais incluem a introdução ou a adaptação de tanques de mistura aquecidos, de tanques de reação aquecidos, de alimentadores de borracha, e de tanques de armazenamento (Heitzman 1992). A modificação das centrais de produção pode ser contornada através da utilização de unidades móveis de produção (Figura 2.10) com base no sistema *McDonald*. Estas unidades móveis são, na prática, montadas num reboque que pode ser transportado para as centrais de fabrico de misturas betuminosas. A unidade móvel recebe o granulado de borracha numa tremonha e, de seguida, encaminha-o para a câmara de mistura onde é misturada com o betume, sendo posteriormente armazenada a mistura no tanque de reação portátil. Após a interação, o betume-borracha é transferido para outro compartimento que irá

alimentar a central betuminosa de forma a produzir misturas betuminosas com borracha (Presti 2013).

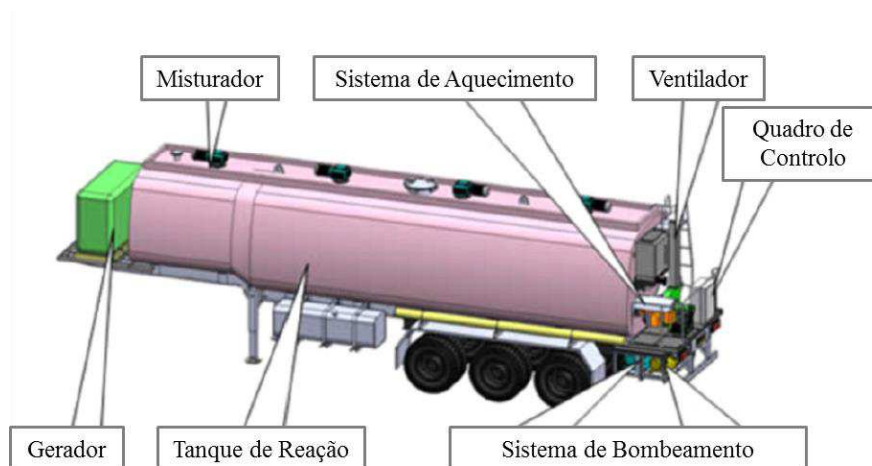


Figura 2.10 – Unidade móvel de produção de betume-borracha, adaptado de Presti (2013)

2.3.3.4 Sistema Terminal Blend

No sistema *terminal blend* a digestão da borracha pelo betume é efetuada a elevadas temperaturas em unidades industriais. Este processo tem sido utilizado desde 1989 no Estado do Texas (Estados Unidos) e caracteriza-se por utilizar quantidades de borracha inferiores às utilizadas no sistema *continuous blend* (Takallou & Takallou 2003). Os betumes-borracha obtidos por este processo possuem estabilidade durante a armazenagem, podendo ser transportados para a obra, sem perda das suas características, necessitando porém, da adaptação dos tanques (Fontes 2009).

2.4 Misturas Betuminosas com Borracha Adicionada por Via Húmida

O processo húmido está na origem da denominação do betume modificado com borracha, que é um composto formado por betume convencional e granulado de borracha de pneus usados, usualmente designado betume-borracha (Feiteira Dias 2011).

Segundo Caltrans (2003), o betume-borracha deve ser fabricado a temperaturas elevadas (superiores a 177°C), com elevada agitação, para manter as partículas de borracha em suspensão durante a mistura e para permitir a interação física entre o betume convencional e o granulado de borracha. O betume-borracha deve conter entre 18% e 22% de granulado de borracha em relação à massa total de ligante. Deverão ser utilizados óleos extensores para

reduzir a viscosidade do ligante, facilitar a pulverização da borracha e melhorar a trabalhabilidade da mistura betuminosa. Antes da adição da borracha, o betume convencional deve estar a uma temperatura compreendida entre 204°C e 226°C. Após a adição da borracha ao betume, estes, a uma temperatura compreendida entre 190°C e 218°C, devem interagir durante um período mínimo de 45 minutos, não ultrapassando o máximo de 4 horas.

Em Portugal, para misturas betuminosas com borracha adicionada por via húmida, segundo o Laboratório Nacional de Engenharia Civil - LNEC, de acordo com os seus documentos DA3 (LNEC 2006) e DA15 (LNEC 2008), o betume e a borracha deverão estar em contacto, a uma temperatura de aproximadamente 190°C, durante um período compreendido entre 60 e 240 minutos (tempo de reação). Após este período deverá ser adicionado o agregado mineral ao betume-borracha.

O betume-borracha é utilizado como ligante de vários materiais utilizados na pavimentação asfáltica como, por exemplo, em selantes de fendas, em tratamentos superficiais e em misturas betuminosas a quente. As misturas betuminosas a quente com betume-borracha são aplicadas em camadas de desgaste com espessura até 60 mm. Os tratamentos superficiais são utilizados principalmente para impermeabilizado e preservação das características superficiais do pavimento, sendo dos materiais mais utilizados os SAM -*Stress Absorbing Membrane*. Os tratamentos superficiais, aplicados entre camadas betuminosas, também funcionam como retardadoras de propagação de fendas, designando-se por SAMI-R - *Stress-absorbing membrane interlayer-Rubber* (Caltrans 2003).

Internacionalmente, por diversos autores (Roberts et al. 1989; Hicks 2002; Baker et al. 2003; Caltrans 2003; Fontes et al. 2007; Zareh & Way 2009), são destacados os benefícios da utilização de misturas betuminosas com betume-borracha em relação às misturas betuminosas com betume convencional, nomeadamente: maior resistência ao fendilhamento; melhor resistência ao envelhecimento e oxidação; melhoria da resistência à fadiga e à propagação de fendas; maior resistência à deformação permanente; redução dos efeitos de projecção de água durante as chuvas; redução dos custos de conservação considerando o melhor desempenho do pavimento; e economia de recursos naturais através da utilização de materiais reaproveitados.

Em Portugal, no que se refere a misturas betuminosas com borracha adicionada por via húmida, o betume-borracha é aplicado em camadas de desgaste com misturas betuminosas rugosas (MBR) e abertas (MBA), com alta (BBA) e média (BBM) percentagem de borracha (LNEC 2006; LNEC 2008). Para estas misturas betuminosas, apresentam-se, no Quadro 2.2, os requisitos dos fusos granulométricos (EP 2014).

Quadro 2.2 – Requisitos dos fusos granulométricos para camada de desgaste, EP (2014)

Abertura dos peneiros (mm)	Tipo de mistura betuminosa em camada de desgaste			
	MBA-BBA	MBR-BBA	MBA-BBM	MBR-BBM
20	-	100	-	-
14	-	90 - 100	100	100
12,5	100	-	-	-
10	90 - 100	58 - 88	80 - 100	83 - 100
8	70 - 88	38 - 60	60 - 80	62 - 82
6,3	-	-	-	-
4	20 - 35	20 - 32	17 - 27	28 - 38
2	6 - 10	12 - 20	15 - 25	25 - 35
0,5	3 - 7	6 - 13	8 - 16	12 - 22
0,125	-	4 - 8	-	-
0,063	2 - 4	3 - 6	4 - 6	7 - 9

Fontes et al. (2007) efetuaram a avaliação do desempenho mecânico de misturas betuminosas produzidas com betume modificado com borracha de pneus usados através do processo húmido, utilizando o sistema *terminal blend* e o sistema *continuous blend*. A avaliação do comportamento mecânico das misturas betuminosas incluiu a resistência à fadiga, através do ensaio de flexão em quatro pontos, e da deformação permanente, utilizando o ensaio de corte simples repetido à altura constante. Foram produzidas misturas betuminosas densas com betume-borracha *terminal blend* e misturas betuminosas descontínuas com betume borracha *continuous blend*. Foi ainda produzida uma mistura betuminosa de referência sem borracha.

Na Figura 2.11 apresentam-se as leis de fadiga das misturas betuminosas estudadas. Verificou-se que a mistura descontínua, com betume-borracha do tipo *terminal blend*, apresentou maior resistência à fadiga em relação às restantes misturas betuminosas. Ambas as misturas com borracha apresentaram melhor comportamento à fadiga que a mistura convencional, o que demonstrou que a presença de borracha melhorou a resistência à fadiga

das misturas betuminosas. A mistura betuminosa densa, com betume-borracha do tipo *terminal blend*, mesmo com um teor de betume (6,0%) inferior ao da mistura betuminosa descontínua (8,0%), apresentou uma maior resistência à fadiga, facto que foi atribuído à qualidade do betume-borracha *terminal blend*.

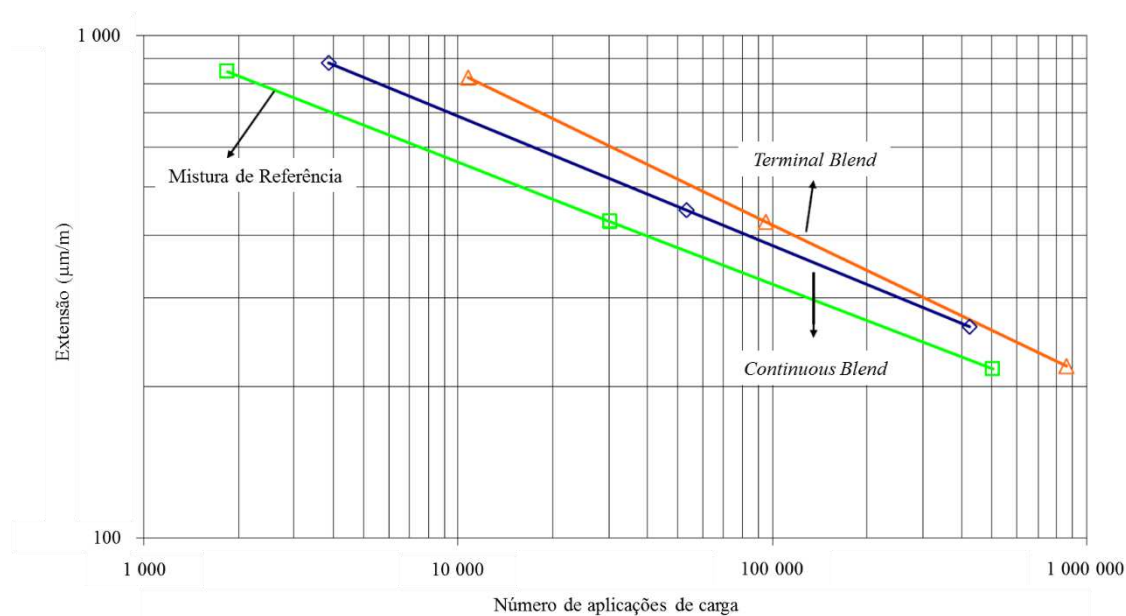


Figura 2.11 – Curvas de fadiga, Fontes et al. (2007)

Na Figura 2.12 apresentam-se os resultados do ensaio de corte repetido, onde se relaciona o número estimado de eixos padrão de 80 kN que, à temperatura de 60 °C, gerou uma rodeira de 12,7 mm nas misturas betuminosas. Observou-se que a mistura betuminosa de controlo apresentou um desempenho inferior às misturas betuminosas com betume-borracha, revelando menor suscetibilidade térmica destas misturas no que se refere à resistência à deformação permanente. Relativamente ao tipo de betume-borracha utilizado, a mistura betuminosa produzida com betume do tipo *terminal blend* apresentou um desempenho superior à mistura com betume do tipo *continuous blend*. Ambas as misturas betuminosas com borracha apresentaram melhor comportamento à deformação permanente que a mistura betuminosa de controlo.

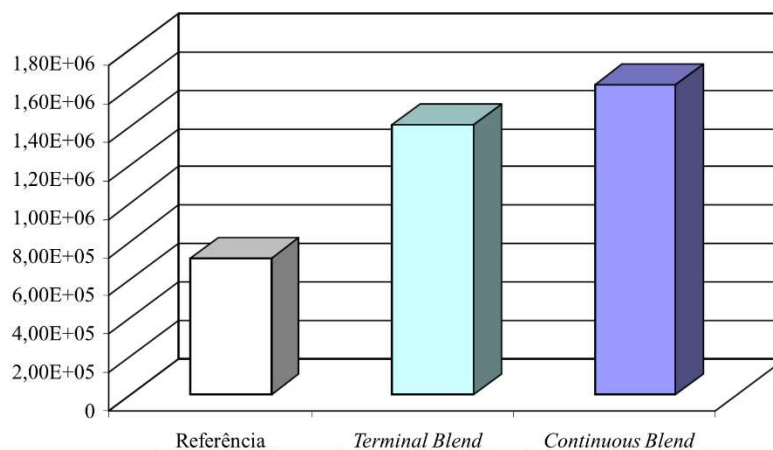


Figura 2.12 – N.º de eixos padrão de 80 kN que originam uma rodeira de 12,7 mm nas misturas a 60 °C, Fontes et al. (2007)

De forma resumida, do estudo efetuado por Fontes et al. (2007), concluiu-se que as misturas betuminosas com betume-borracha estudadas apresentaram melhores características que a mistura betuminosa convencional. Relativamente ao tipo de betume-borracha, para as misturas estudadas, o betume obtido pelo processo *terminal blend* apresentou um desempenho superior ao betume obtido pelo processo *continuous blend*.

Batista, Antunes, & Fonseca (2006), complementarmente a estudos efetuados por Sousa et al. (1999) e por Antunes et al. (2000), efetuaram ensaios de avaliação do módulo de deformabilidade, ensaios de fadiga e ensaios de deformação permanente a amostras de pavimento, há 6 anos em serviço na estrada nacional EN 104. A avaliação do módulo de deformabilidade e do comportamento à fadiga foi efetuada recorrendo a ensaios de flexão em quatro pontos, com extensão controlada, a vigas betuminosas. A avaliação do comportamento à deformação permanente foi efetuada recorrendo a ensaios de simulação em pista de laboratório a lajes betuminosas.

Na Figura 2.13, apresenta-se a resistência à fadiga: da mistura betuminosa convencional produzida e envelhecida em laboratório (MB-B35/50); das misturas betuminosas com betume-borracha extraídas do pavimento da EN 104, com e sem envelhecimento em laboratório (MB-BMB EN104-2000); e da mistura betuminosa com betume-borracha retirada do pavimento da EN 104 após 6 anos em serviço (MB-BMB EN104-2005).

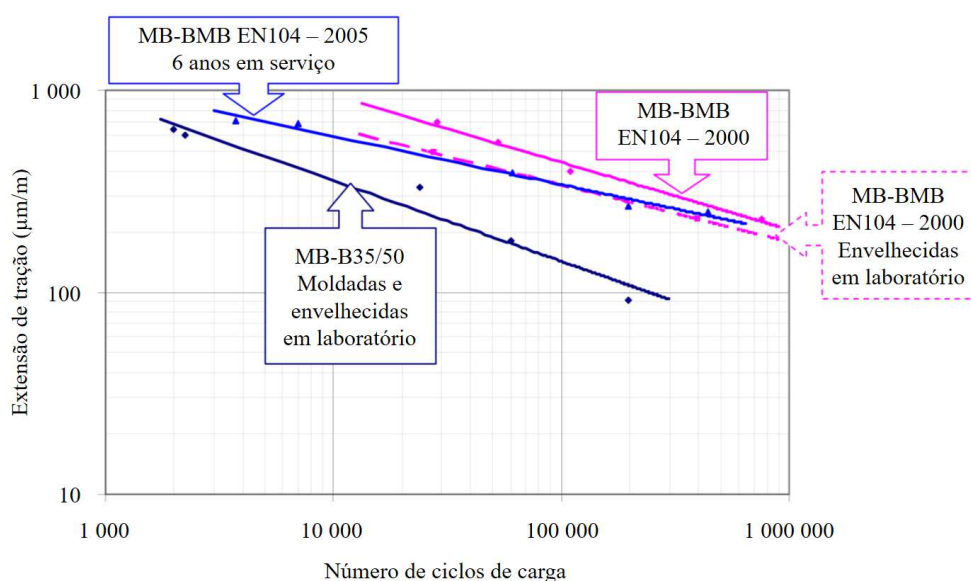


Figura 2.13 - Resistência à fadiga das misturas betuminosas com betume-borracha, adaptado de Batista et al. (2006)

De acordo com os resultados obtidos no ensaio de fadiga (Figura 2.13), os autores observaram o seguinte (Batista et al. 2006; Feiteira Dias 2011): uma vez que as leis de fadiga obtidas para as misturas “MB-BMB EN104-2000 Envelhecidas em laboratório” e “MB-BMB EN104-2005” são semelhantes, o método de envelhecimento a longo prazo utilizado em laboratório pareceu simular adequadamente o envelhecimento das misturas aplicadas em obra após 6 anos em serviço; o desempenho à fadiga das misturas “MB-BMB EN104-2000” e “MB-BMB EN104-2000 Envelhecidas em laboratório” são relativamente próximos, em especial para níveis de extensão mais baixos; o desempenho à fadiga das misturas betuminosas com betume-borracha é melhor do que o das misturas convencionais envelhecidas.

Na Figura 2.14 apresenta-se a evolução da velocidade de deformação das misturas betuminosas com betume-borracha extraídas do pavimento da EN 104. Os resultados correspondem a ensaios de pista realizados a 4 lajes, duas recolhidas em obra na altura da pavimentação e duas recolhidas em obra após 6 anos em serviço.

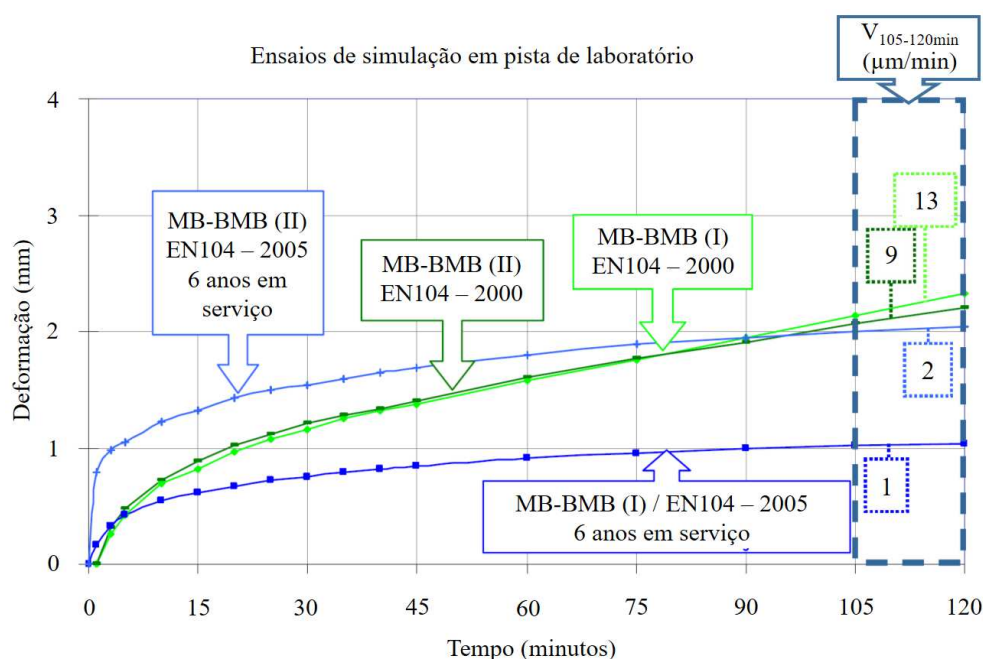


Figura 2.14 - Evolução da rodeira com o tempo para as misturas betuminosas com betume-borracha, adaptado de Batista et al. (2006)

Da avaliação à deformação permanente (Figura 2.14), os autores verificaram que os valores de velocidade de deformação ($V_{105/120}$) das misturas betuminosas com betume-borracha melhoraram significativamente após os 6 anos de serviço. Esta melhoria significativa do comportamento à deformação permanente das misturas betuminosas em serviço esteve associada, ao longo do tempo, ao aumento da quantidade de asfaltenos e à diminuição da quantidade de maltenos no betume, o que levou a um endurecimento do betume que ficou com menor suscetibilidade térmica (Batista et al. 2006).

Devido à maior viscosidade do ligante betuminoso modificado com borracha granulada de pneus usados, as misturas com betume-borracha precisam de temperaturas mais elevadas no seu processo de fabrico e compactação. O recurso a tecnologias temperadas, que permitam reduzir as temperaturas de produção e de compactação das misturas betuminosas, pode ser uma solução mais sustentável para produção das misturas com betume borracha a menores temperaturas, desde que isso não afete o seu desempenho. Neste sentido, Silva et al. (2014), efetuaram o estudo da utilização de uma destas tecnologias para produzir misturas com betume-borracha a menores temperaturas. Desta forma foi estudado o efeito que a aplicação de um aditivo surfactante (Cecabase[®]RT) teve nas propriedades dos ligantes com e sem borracha, com a redução de temperatura de produção. Foi, ainda, comparado o desempenho

de misturas betuminosas com betume-borracha normais e temperadas. As misturas estudadas foram misturas betuminosas rugosas com betume modificado com alta percentagem de borracha (MBR-BBA). Quando se tratou da mistura formulada à temperatura normal, com betume convencional, adotou-se a designação MBR-BBA Conv. Quando se tratou da mistura temperada, com betume aditivado, adotou-se a designação MBR-BBA + Surf.

Neste estudo, o desempenho das misturas betuminosas com betume borracha produzidas a diferentes temperaturas (normal e temperada) foi verificado recorrendo, principalmente, à avaliação da compactabilidade, do módulo de rigidez, da resistência à fadiga, da resistência à deformação permanente e da sensibilidade à água das mesmas (Silva et al. 2014).

De acordo com a norma EN 12697-10 (CEN 2001a), a avaliação da evolução do volume de vazios durante a compactação foi efetuada através do ensaio de compactabilidade. Na Figura 2.15 apresentam-se os resultados da variação do volume de vazios em função do número de pancadas obtido para as duas misturas MBR-BBA em estudo.

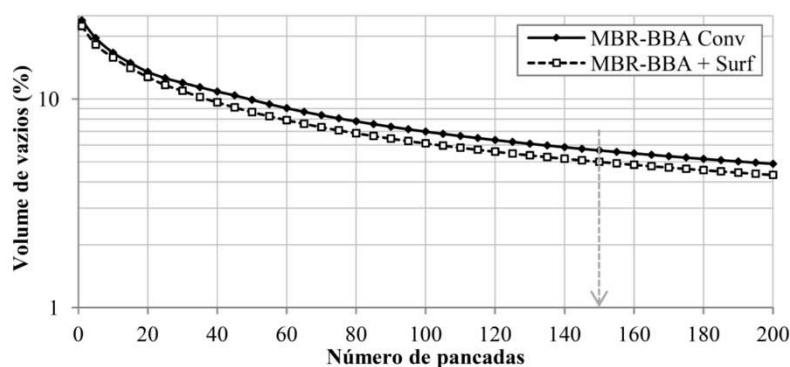


Figura 2.15 - Variação média do volume de vazios das misturas em estudo no ensaio de compactabilidade, Silva et al. (2014)

O módulo de rigidez das misturas estudadas foi obtido num ensaio de flexão em quatro pontos, com uma configuração de carga repetitiva e sinusoidal, em quatro provetes com $5,1 \times 6,3 \times 38,0 \text{ cm}^3$, tal como indicado na norma EN 12697-26 (CEN 2004b). No ensaio foi utilizada uma temperatura de $20 \text{ }^\circ\text{C}$ e um varrimento de frequências entre 0,1 e 10 Hz. Os valores do módulo de rigidez e do respetivo ângulo de fase das misturas MBR-BBA com e sem aditivo (Figura 2.16), para as várias frequências consideradas, resultaram da média de quatro ensaios.

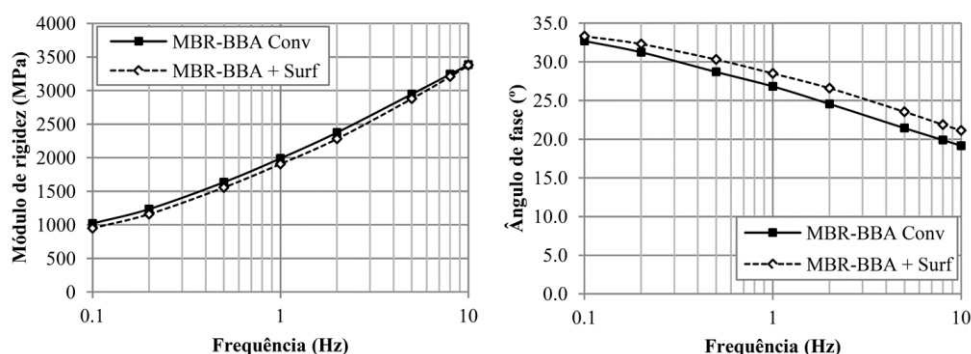


Figura 2.16 - Variação do módulo de rigidez e do ângulo de fase das misturas betuminosas em função da frequência de aplicação de carga, Silva et al. (2014)

A resistência à fadiga das misturas betuminosas foi determinada, de acordo com a norma EN 12697-24 (CEN 2004a), recorrendo a ensaios de flexão em 4 pontos com extensão controlada, realizados a 20 °C, com carregamento sinusoidal repetido a uma frequência de 10 Hz, sobre provetes com a dimensão de 5,1×6,3×38,0 cm³. O critério de rotura por fadiga correspondeu à tradicional redução do módulo de rigidez para 50% do seu valor inicial, tendo-se obtido assim o número de ciclos que originou a rotura por fadiga para o nível de extensão desse ensaio. As leis de fadiga das duas misturas MBR-BBA em estudo apresentam-se na Figura 2.17.

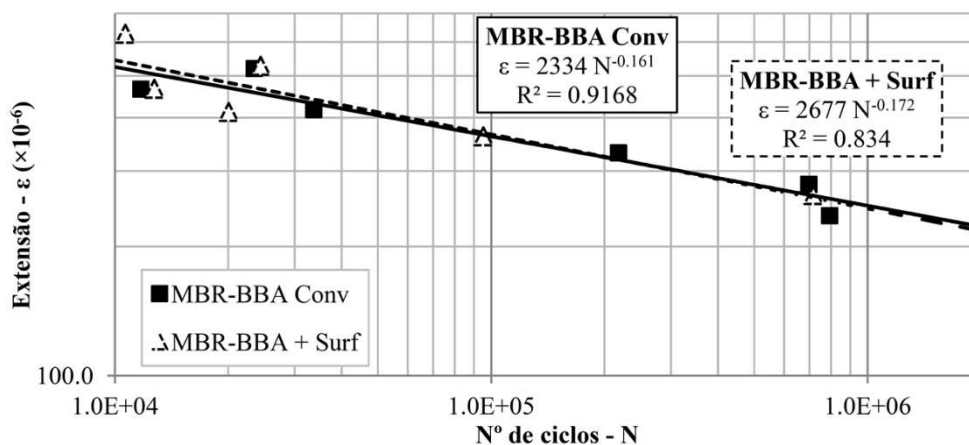


Figura 2.17 - Resultados do ensaio de fadiga e correspondentes leis de fadiga das misturas estudadas, Silva et al. (2014)

A resistência às deformações permanentes das misturas betuminosas foi determinada em ensaios de pista conduzidos a 50 °C e à frequência de 26,5 ciclos de carga por minuto, com

um carregamento de 700 N sobre lajes com a dimensão de $30 \times 30 \times 4 \text{ cm}^3$. Ao longo do ensaio, de acordo com a norma EN 12697-22 (CEN 2003a), mediu-se com um LVDT a deformação permanente sofrida pela mistura na zona de passagem da roda, a cada 25 ciclos de carga, até aos 10000 ciclos de carga. Apresentam-se, na Figura 2.18, os resultados do ensaio de deformação permanente às misturas betuminosas estudadas.

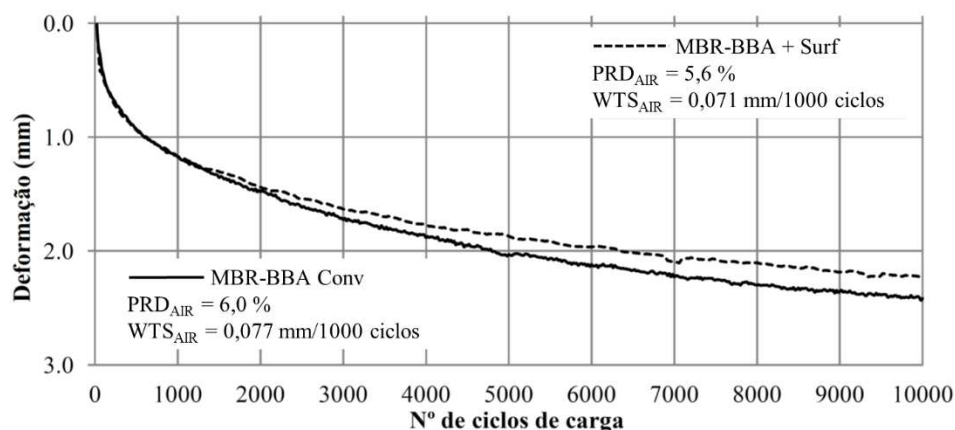


Figura 2.18 – Resultados do ensaio de deformação permanente às misturas betuminosas estudadas, adaptado de Silva et al. (2014)

A avaliação da sensibilidade à água foi efetuada através da comparação entre os valores médios das resistências à tração indireta, a $25 \text{ }^\circ\text{C}$, de dois grupos de provetes cilíndricos, de acordo com a norma EN 12697-12 (CEN 2008). O primeiro grupo (não acondicionado) foi apenas colocado ao ar à temperatura de ensaio de $25 \text{ }^\circ\text{C}$, enquanto o segundo grupo (acondicionado) foi previamente mantido em água durante 30 minutos, com vácuo a uma pressão de $6,7 \text{ kPa}$ de forma a garantir que os poros eram totalmente preenchidos pela água, seguidamente foi acondicionado em banho-maria à temperatura de $40 \text{ }^\circ\text{C}$ durante 68 a 72 horas, e finalmente foi colocado à temperatura de ensaio ($25 \text{ }^\circ\text{C}$) o tempo necessário para garantir uma temperatura dos provetes uniforme. Os resultados da avaliação da sensibilidade à água apresentam-se no Quadro 2.3.

Quadro 2.3 – Resultados do ensaio de sensibilidade à água às misturas em estudo, Silva et al. (2014)

Mistura	Condicionamento dos provetes	Volume de vazios (%)	Baridade média (g/cm ³)	Resistência à tração média – ITS (kPa)	Resistência conservada – ITSR (%)
MBR-BBA Conv	Ar a 25 °C	3,8	2,31	1200	89,50
	Vácuo e imersão em água a 40 °C		2,30	1080	
MBR-BBA + Surf	Ar a 25 °C	3,3	2,28	1210	93,38
	Vácuo e imersão em água a 40 °C		2,28	1150	

As principais conclusões retiradas deste estudo foram (Silva et al. 2014):

- A incorporação de 0,5% de aditivo surfactante praticamente não alterou as propriedades do betume-borracha, embora tenha diminuído ligeiramente a sua penetração e aumentado um pouco a temperatura anel e bola e a resiliência;
- Foi possível reduzir em 30 °C o aquecimento dos agregados da mistura MBR-BBA aditivada sem comprometer a compactação da mistura, obtendo-se até volumes de vazios mais reduzidos do que na mistura sem aditivo;
- As pequenas diferenças observadas entre as misturas MBR-BBA convencional e aditivada demonstraram uma ligeira tendência para que a utilização do aditivo surfactante diminua a rigidez, aumente o ângulo de fase, reduza a vida à fadiga, aumente a resistência à deformação permanente e diminua a sensibilidade à água;
- Em resumo, o desempenho das misturas com betume borracha MBR-BBA convencional e aditivada foram praticamente iguais nos vários ensaios realizados, o que valida a possibilidade de utilizar o aditivo surfactante para reduzir bastante a temperatura de produção das misturas com betume borracha. Contudo, estes resultados laboratoriais devem ser validados em trechos experimentais.

2.5 Misturas Betuminosas com Borracha Adicionada por Via Seca

O estudo do comportamento das misturas betuminosas com a adição de borracha por via seca assume-se como uma necessidade da atualidade porque estas têm um processo de fabrico muito mais barato e menos complexo que o processo por via húmida, e

potencialmente (Picado-Santos & Feiteira Dias 2009) pode constituir uma alternativa vantajosa não só às misturas produzidas por via húmida como principalmente às tradicionais.

Alguns estudos anteriores (Wong & Won 2007; Lee et al. 2008; Fontes et al. 2010; Wanga et al. 2012) avaliaram as propriedades mecânicas das misturas betuminosas com borracha por via seca em termos da suscetibilidade à temperatura, da sensibilidade à água, do comportamento à deformação permanente e do comportamento à fadiga.

A generalidade dos ensaios laboratoriais e de campo mostram que as misturas betuminosas modificadas com borracha por via seca apresentam um desempenho inferior quando comparadas com as misturas betuminosas modificadas com borracha por via húmida. Ultimamente, têm sido realizados vários estudos laboratoriais no sentido de encontrar a granulometria adequada do agregado e da borracha, a percentagem ótima de betume, e o procedimento de preparação que permitam melhorar o desempenho das misturas betuminosas com borracha adicionada por via seca (Cao 2007; Akisetty et al. 2010).

Estes últimos estudos verificaram que as propriedades mecânicas das misturas betuminosas modificadas com borracha por via seca são muito sensíveis às alterações da quantidade de borracha adicionada. Os critérios de formulação, tais como a granulometria da mistura, a percentagem de betume e o volume de vazios foram considerados fundamentais para o desempenho deste tipo de misturas. Devido ao aumento de volume das partículas de borracha, aquando da sua interação com o betume, estas têm dificuldade em se movimentar dentro da mistura, provocando uma grande variação do volume de vazios da mesma, que, por dificultar a compactação da mistura, provoca uma redução do seu desempenho (Hassan et al. 2014).

Em Portugal, estudos efetuados por Dias & Picado-Santos (2009) e por Feiteira-Dias et al. (2014) indicam que o processo de fabrico por via seca, que utiliza partículas de borracha de dimensões ultrafinas (como no processo por via húmida, diâmetro nominal inferior a 0,8 mm), produz misturas betuminosas descontínuas com qualidade similar às produzidas por via húmida.

O conceito de utilizar a borracha nas misturas betuminosas, por via seca, foi desenvolvido na Suécia, onde foram incorporadas partículas de borracha, relativamente grandes, nas misturas betuminosas. O objetivo inicial desta modificação das misturas betuminosas era melhorar o atrito e a durabilidade do pavimento. Este tipo de mistura foi produzido na

Escandinávia (norte da Europa) com os nomes comerciais Europeus “*Skega Asphalt*” ou “*Rubit*”. Esta metodologia foi patenteada de seguida pelos Estados Unidos, em 1978, com o nome comercial “*PlusRide*”. Neste processo é adicionado 1% a 3% de granulado de borracha em relação à massa total da mistura betuminosa. As dimensões do granulado de borracha variam entre 2,0 mm e 4,2 mm. A percentagem volumétrica de vazios (porosidade) da mistura varia entre 2% e 4% e é, geralmente, conseguida com uma percentagem de betume entre 7,5% e 9%. Com esta modificação por via seca, as partículas de borracha funcionam como agregados elásticos que permitem aumentar a flexibilidade da mistura quando carregada. As partículas finas têm mais facilidade em reagir com o betume, aumentando a sua viscosidade tornando o ligante mais flexível a temperaturas baixas e, ao mesmo tempo, mantendo uma elevada rigidez a elevadas temperaturas (FHWA 1998; Thodesen et al. 2009; Nejad et al. 2012; Cong et al. 2013; Presti 2013).

Em 1986, Takallou desenvolveu uma metodologia alternativa ao *PlusRide* designada de “TAK genérico”. Esta metodologia utilizava uma granulometria mais fina (inferior a 1 mm) e uma incorporação de aproximadamente de 2% de borracha por massa de mistura total. Nesta metodologia, o princípio de interação entre o betume convencional e a borracha regia-se pelo seguinte: as partículas mais finas de borracha interagem com o betume convencional melhorando as propriedades do mesmo; e as partículas de borracha de maiores dimensões preenchem os vazios da mistura betuminosa (CEDEX 2007).

Com o objetivo de facilitar o descolamento do gelo da superfície dos pavimentos betuminosos, o *US Army Corps of Engineers Cold Region Research Engineering Laboratory* (CRREL) desenvolveu, também, uma mistura betuminosa com borracha adicionada por via seca designada por “*Chunk Rubber Asphalt Concrete*” (Heitzman 1992). A dimensão do granulado de borracha varia entre 4,75 mm e 9,5 mm, e era adicionado à mistura betuminosa nas quantidades de 3%, 6% e 12% em relação à massa de agregado. A distribuição granulométrica dos agregados era ajustada de forma a acomodar o granulado de borracha, que tinha dimensões relativamente elevadas. O teor ótimo de betume era de 6,5%. Os resultados laboratoriais efetuados a este tipo de mistura indicaram que, para altas percentagens de borracha, podia, potencialmente, ser facilitado o descolamento do gelo da superfície dos pavimentos betuminosos (Rahman 2004).

Segundo a FHWA - *Federal Highway Administration*, o processo a seco é qualquer método que adiciona granulado de borracha diretamente na misturadora da central de betuminosos,

onde, antes da adição do betume convencional aos agregados, estes são pré-aquecidos e misturados com a borracha. O produto resultante é designado, geralmente, por RUMAC - *Rubber Modified Hot-Mix Asphalt Concrete*. Este processo pode ser utilizado em misturas betuminosas densas, rugosas ou abertas (FHWA 1998). Apresenta-se, no Quadro 2.4, a granulometria do granulado de borracha utilizado neste tipo de misturas.

Quadro 2.4 – Granulometria da borracha das misturas betuminosas FHWA (1998)

Abertura dos Peneiros	Porcentagem, em Massa, que Passa
6,3 mm	100
4,75 mm	76 - 100
2,0 mm	28 - 42
0,85 mm	16 - 24

Em geral, no processo por via seca, antes da adição do betume convencional, o granulado de borracha é adicionado ao agregado mineral pré-aquecido. O agregado mineral é aquecido a temperaturas entre 200 a 210°C e misturado com o granulado de borracha durante 15 segundos, formando uma composição homogénea. Posteriormente, adiciona-se o betume convencional, aquecido a uma temperatura entre 140 a 160°C, à mistura agregado-borracha (Oliver 2000; Visser & Verhaeghe 2000; Feiteira Dias 2011).

De 1993 até 1999, pelo *Oregon Department of Transportation* (Estados Unidos da América), foram monitorizadas secções de pavimentos contendo misturas betuminosas com borracha adicionada por via seca, nomeadamente *RUMAC* e *PlusRide*. Desta monitorização, que recorreu a um procedimento bastante diferente do abordado em estudos recentes (percentagens de betume, percentagens de borracha e tamanhos do granulado de borracha muito diferentes) conclui-se que este tipo de misturas betuminosas com borracha, em relação às misturas betuminosas sem borracha, apresentou pior desempenho e um custo de construção mais elevado (Hunt 2002).

Huang et al. (2002), em Luisiana, nos Estados Unidos da América, verificaram que as misturas betuminosas com borracha adicionada por via seca, *PlusRide* (3% de granulado de borracha em relação à massa da mistura betuminosa com espessura de 40 mm) e *TAK Genérico* (2% de granulado de borracha em relação à massa da mistura betuminosa com espessura de 40 mm), após 5 a 7 anos em serviço, apresentaram uma resistência à fadiga e à deformação permanente inferior ou igual à mistura betuminosa de controlo. Neste período não foram visíveis sinais de fendilhamento. Ensaios de campo, em Cansas, também nos

Estados Unidos da América, demonstraram que as misturas betuminosas com borracha adicionada por via seca, em geral, no que respeita à deformação permanente e à fadiga, apresentam um desempenho diferenciado. Após cinco anos em serviço, as secções de pavimento contruídas com misturas betuminosas abertas, pelo processo seco, apresentaram um bom comportamento à deformação permanente, no entanto foi evidente o aparecimento de fendilhamento à superfície. Com estes ensaios concluiu-se que a utilização de granulado de borracha neste tipo misturas betuminosas a quente era possível mas não era, ainda, economicamente viável (Fager 2001; Rahman 2004).

Oliver (2000) verificou que misturas betuminosas produzidas por via seca, utilizando 8% de betume e 2,5% de granulado de borracha, em relação à massa de agregado, apresentam um comportamento à fadiga, pelo menos, três vezes melhor em comparação com o processo por via húmida e oito vezes melhor em comparação com uma mistura betuminosa de controlo sem borracha (com a mesma granulometria e a mesma quantidade de betume das misturas com borracha).

Khalid & Artamendi (2002), num estudo laboratorial efetuado a misturas betuminosas com borracha adicionada por via seca, verificaram que a utilização de partículas de borracha com dimensão máxima de 3 mm, numa percentagem até 10% em relação à massa total de agregado, tem um efeito adverso nas propriedades volumétricas, na elasticidade, na durabilidade e no comportamento à deformação permanente das misturas utilizadas em camadas betuminosas de desgaste e de base.

Em Minnesota, nos Estados Unidos da América, foram construídos sete trechos experimentais, cinco com misturas betuminosas com borracha adicionada por via seca e dois com misturas betuminosas de controlo. Estes trechos serviram para avaliar características das misturas betuminosas tais como: a sensibilidade à água; o comportamento a baixas temperaturas; o módulo de deformabilidade; e a resistência à tração e à deformação permanente (Stroup-Gardiner et al. 1996). Foi utilizado granulado de borracha, de dimensões até 2,38 mm, pré-tratado com um derivado do petróleo de baixa viscosidade. Os ensaios laboratoriais mostraram que as misturas betuminosas com borracha têm maior capacidade para dissipar as tensões geradas pelos gradientes térmicos, possuindo, assim, melhor capacidade de deformação a baixas temperaturas. Com o tratamento do granulado de borracha verificou-se uma melhoria na sensibilidade à água e no comportamento a baixas temperaturas das misturas betuminosas. Após dois anos em serviço todos os trechos

experimentais tiveram um bom desempenho, não se verificando diferenças significativas nos módulos de deformabilidade das camadas betuminosas (Rahman 2004).

Em Espanha, segundo o *Manual de Empleo de Caucho de NFU en Mezclas Bituminosas*, nas misturas betuminosas com borracha adicionada por via seca, o granulado de borracha é introduzido diretamente no misturador da central de produção de misturas betuminosas como se fosse um agregado mineral. De acordo com o tamanho do granulado de borracha, o processo por via seca segue duas técnicas distintas (CEDEX 2007).

A primeira técnica recorre a granulado de borracha com tamanho máximo de 2 mm. Nesta técnica, o granulado de borracha tem, na mistura betuminosa, dois comportamentos distintos. As partículas mais finas, normalmente de dimensões inferiores a 0,5 mm, num processo similar ao que ocorre na via húmida, interagem com o betume a temperaturas elevadas e modificam a reologia do mesmo. Por outro lado, as partículas de borracha mais grosseiras comportam-se como um agregado elástico dentro do esqueleto mineral da mistura betuminosa. A superfície destas partículas, embora de forma diferente das partículas mais finas, também reage com o betume, criando uma interface betume-borracha que liga ambos os materiais. Esta técnica tem sido utilizada em Espanha considerando uma percentagem de 2% de borracha em relação à massa total da mistura betuminosa. Na segunda técnica, é utilizado granulado de borracha mais fino (tamanho máximo das partículas de borracha de 0,5 mm) e em proporções inferiores. O granulado de borracha, por ser mais fino, atua como um modificador do betume adicionado no misturador. Este processo pode ser considerado como intermédio entre o processo por via seca da primeira técnica e o processo por via húmida (CEDEX 2007; Ministério de Fomento 2007).

O fabrico de misturas betuminosas com borracha adicionada por via seca em Espanha é efetuado recorrendo a centrais descontínuas. As principais diferenças em relação ao fabrico das misturas betuminosas convencionais são as seguintes (CEDEX 2007):

- Deve-se aumentar a temperatura de fabrico (são usais temperaturas entre 175°C e 180°C, à saída do misturador, para misturas semidensas e descontínuas do tipo F, e de 160°C para misturas drenantes e descontínuas do tipo M).
- Na mistura dos materiais, o granulado de borracha é adicionado primeiramente aos agregados e apenas alguns segundos depois é adicionado o betume. Para garantir a homogeneidade da mistura e o envolvimento do granulado de borracha pelo betume

são necessários tempos mais longos para a mistura dos materiais. Por exemplo, para misturas betuminosas com 1% de borracha o tempo total de mistura dos materiais, em relação ao processo convencional, deve ser 10% a 15% superior.

- As misturas betuminosas com borracha, em relação às misturas betuminosas convencionais, para o mesmo peso ocupam um maior volume (1 a 5% maior).
- No processo por via seca, as misturas requerem um período de armazenamento em silo ou em caminhão antes da colocação em obra, de forma a que ocorra a interação entre o betume e a borracha, prevenindo assim o efeito de descompactação após a pavimentação.

Moreno, Rubio, & Martinez-Echevarria (2012) efetuaram um estudo laboratorial com o intuito de avaliar a influência do tempo de digestão (tempo de contacto entre o betume e a borracha) e da percentagem do granulado de borracha, nas misturas betuminosas com borracha adicionada por via seca. Foi utilizado granulado de borracha de dimensões inferiores a 0,6 mm, ou seja, partículas ultrafinas quando comparadas com as utilizadas na maioria das metodologias descritas anteriormente. No que respeita à quantidade de borracha, com a exceção da mistura de referência sem borracha, foram avaliadas misturas betuminosas com 0,5%; 1,0% e 1,5% de borracha em relação à massa total da mistura betuminosa. Os tempos de digestão considerados foram 45 minutos, 90 minutos e 120 minutos. Neste estudo foram avaliadas a sensibilidade à água (Figura 2.19) e a resistência à deformação permanente (Figura 2.20). O betume utilizado foi, para as misturas betuminosas com borracha, o betume convencional de penetração nominal 50/70, e para a mistura betuminosa de referência, o betume modificado com polímeros BM3c.

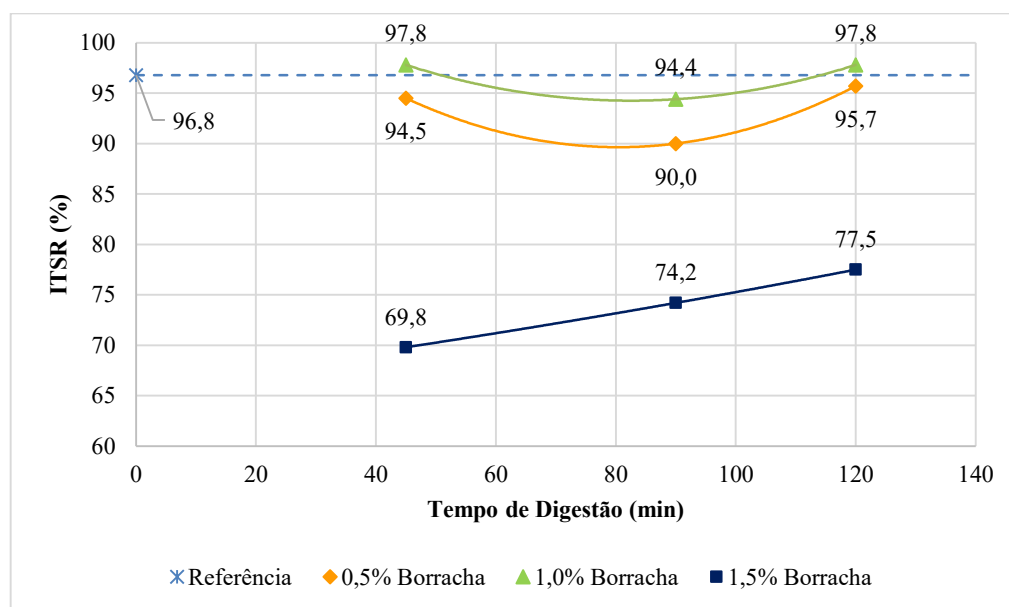


Figura 2.19 – Avaliação da sensibilidade à água, adaptado de Moreno et al. (2012)

Como principais conclusões deste estudo efetuado no laboratório de Engenharia da Universidade de Granada, Espanha, destacam-se (Moreno et al. 2012):

- Tanto a quantidade de borracha adicionada como o tempo de digestão afetaram significativamente o desempenho mecânico das misturas betuminosas com borracha adicionada por via seca;
- Para misturas betuminosas com percentagens de borracha superiores a 1,0% ocorreu uma redução da densidade, um aumento do volume de vazios e uma redução substancial da coesão das mesmas, originando um fraco desempenho no que respeita à sensibilidade à água;
- Ainda relativamente à sensibilidade à água, as misturas betuminosas, com 0,5% e 1,0% de borracha, apresentaram um comportamento semelhante à mistura de referência sem borracha, sendo esse comportamento melhorado para determinados tempos de digestão;
- A adição de grandes quantidades de borracha às misturas betuminosas (neste caso 1,5%) melhorou a resposta das mesmas às deformações plásticas, possuindo estas, no que respeita à deformação permanente, melhor comportamento que a mistura de referência;
- Para as percentagens de borracha de 0,5% e 1,0%, embora o comportamento à deformação permanente não seja tão satisfatório como para a percentagem de 1,5%,

as misturas betuminosas com borracha apresentaram um comportamento semelhante à mistura de referência, não sendo, neste caso, o tempo de digestão um fator condicionante;

- Resumidamente, apesar de ambas as misturas betuminosas com borracha cumprirem os requisitos dos regulamentos Espanhóis, o estudo permitiu concluir que os valores ideais para as variáveis estudadas são de 45 minutos para o tempo de digestão e de 0,5% e 1,0%, em relação à massa total, para as percentagens de granulado de borracha a adicionar às misturas.

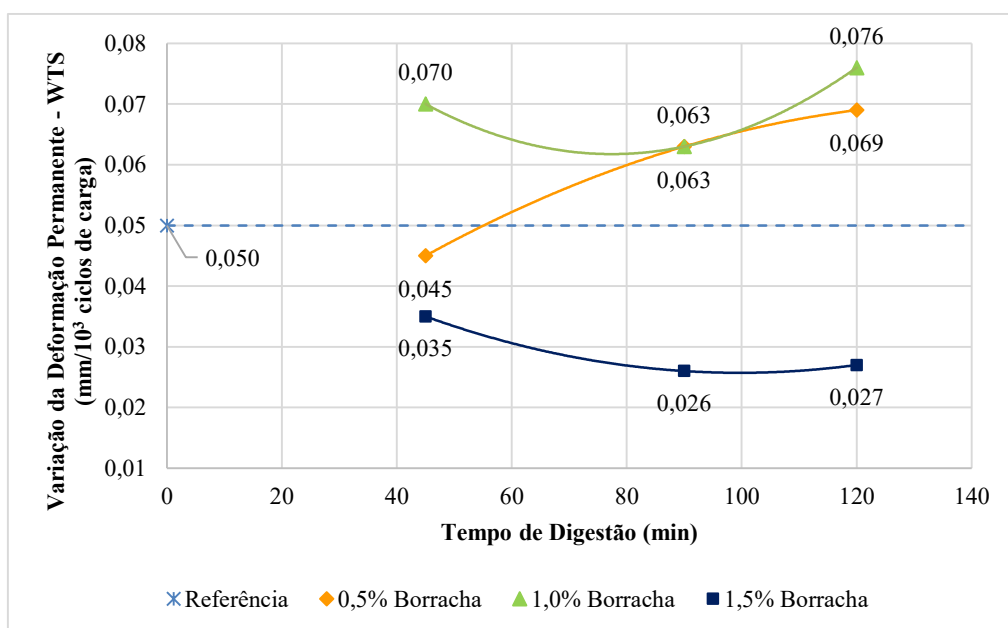


Figura 2.20 – Avaliação da deformação permanente, adaptado de Moreno et al. (2012)

Com o objetivo de investigar a influência da quantidade de borracha no comportamento mecânico de misturas betuminosas com borracha adicionada por via seca, investigadores da Universidade do Minho, Portugal, e da Universidade de Brasília, Brasil, produziram e testaram laboratorialmente (módulo de deformabilidade e comportamento à fadiga) misturas betuminosas densas com borracha (via seca e via húmida) e sem borracha. As dimensões das partículas de borracha utilizadas compreenderam-se entre os 0,5 mm e os 2,0 mm. O betume utilizado em ambas as misturas betuminosas foi o betume convencional de penetração nominal 50/70. A percentagem de betume utilizada foi de 7,0% para a mistura betuminosa sem borracha e 7,95% para as misturas betuminosas com borracha. Para a mistura betuminosa com borracha adicionada por via húmida foi utilizada uma percentagem de 2,2% de borracha em relação à massa de agregados. Para as misturas betuminosas com borracha

adicionada por via seca foram utilizadas as percentagens de 2,2% e de 3,6% de borracha em relação à massa de agregados. A compactação das misturas betuminosas com borracha adicionada por via seca foi efetuada imediatamente após a mistura dos materiais. As principais conclusões deste trabalho foram (Neto et al. 2005):

- As misturas betuminosas com borracha, quer por via seca ou quer por via húmida, apresentaram melhor desempenho que a mistura betuminosa sem borracha. As misturas betuminosas densas, com borracha adicionada por via seca, apresentaram um desempenho ligeiramente superior às misturas betuminosas com borracha, adicionada por via húmida. No que respeita à percentagem de borracha no processo seco, foi para a percentagem de 2,2% que se verificou o melhor comportamento à fadiga.
- A principal melhoria obtida com a incorporação de borracha, nas misturas betuminosas, esteve relacionada com o aumento da vida à fadiga das mesmas. No que respeita ao módulo de deformabilidade, não houve grandes diferenças entre as misturas betuminosas com e sem borracha.

Cao (2007) efetuou um estudo laboratorial das propriedades de misturas betuminosas com diferentes percentagens de borracha adicionada por via seca, nomeadamente, 0%, 1%, 2% e 3% de borracha em relação à massa total da mistura betuminosa. O teor ótimo em betume foi encontrado recorrendo ao procedimento de *Marshall* e fixando um volume de vazios de 4%. Os ensaios a que as misturas betuminosas foram sujeitas foram o ensaio de deformação permanente, à temperatura de 60°C, e o ensaio de tração indireta, à temperatura de -10°C. A borracha utilizada possuía granulometria compreendida entre 1 e 3 mm. Como conclusões deste estudo destacaram-se a melhoria que a adição de borracha, por via seca, provocou nas misturas betuminosas, nomeadamente, melhor resistência à deformação permanente, a altas temperaturas, e maior resistência ao fendilhamento, a baixas temperaturas. Esta melhoria foi mais acentuada para a mistura betuminosa com 3% de borracha.

Hernández-Olivares et al. (2009), com o objetivo de conhecer o comportamento das misturas betuminosas com borracha adicionada por via seca, efetuaram um estudo laboratorial e realizaram um trecho experimental de 2,5 km numa estrada secundária situada entre Salamanca e Cidade Rodrigo (Espanha). Foi considerada uma mistura betuminosa semidensa. Como principais conclusões deste estudo destacou-se o seguinte:

- A percentagem de borracha considerada mais adequada, para este tipo de mistura betuminosa em camada de desgaste, foi de 1% em relação à massa de agregados (20% de borracha em relação à massa de betume). Esta percentagem foi obtida recorrendo a uma sequência de procedimentos laboratoriais que incluíram o ensaio *Marshall*, a sensibilidade à água, o tempo de interação entre a borracha e os restantes elementos da mistura, e ensaios de *Wheel Tracking*. Quanto às partículas de borracha, obtidas pelo processo de trituração mecânica, verificou-se que se estas tiverem dimensões compreendidas entre 0 e 0,5 mm, face a partículas mais grosseiras, originam misturas betuminosas com melhor desempenho. A adição de borracha aumentou a percentagem ótima de betume de 5,1% (mistura sem borracha) para 5,5% (mistura com borracha).
- O processo/tempo de mistura dos materiais também se revelou importante, pois o melhor comportamento da mistura betuminosa ocorreu para o caso em que, após a adição e mistura do betume à borracha e aos agregados, aquecidos a 150°C, se esperou 2 horas (tempo em que ocorreu a interação entre o betume e a borracha) e se misturou novamente todos os materiais para que se procedesse de seguida à compactação.
- Na central de produção, a introdução da borracha na mistura betuminosa pôde ser efetuada de forma análoga à introdução do filer, com a nuance de que a borracha, por ser mais leve, necessitou de mais tempo para se misturar com os agregados.
- O aumento do custo deste processo a seco, devido ao tempo de interação entre o betume e a borracha, foi minimizado uma vez que essa interação também decorreu no período necessário para o transporte e aplicação em obra. Verificou-se que o processo a seco, face ao processo convencional, acarretou um aumento de custo de cerca de 10%.
- Se a interação entre o betume e a borracha for efetuada corretamente, é possível utilizar uma maior percentagem de betume, melhorando, assim, o desempenho geral da mistura betuminosa, resultando para a mesma numa melhor resistência às deformações plásticas e num aumento da durabilidade.

Investigadores da Universidade de Tecnologia da Malásia efetuaram um estudo laboratorial que visou a avaliação das propriedades das misturas betuminosas com borracha adicionada por via seca (partícula de borracha finas, com dimensões compreendidas entre 0,3 mm e 0,6 mm, provenientes da reciclagem de pneus usados). O efeito da presença de borracha nas

misturas betuminosas foi avaliado, em termos de propriedades volumétricas, recorrendo ao ensaio de *Marshall*, e em termos de propriedades de deformação permanente, recorrendo ao ensaio *Wheel Tracking*. Foram modificadas duas misturas betuminosas, uma mistura betuminosa descontínua, SMA14, e uma mistura betuminosa densa, AC14. As percentagens de borracha utilizada em ambas as misturas betuminosas foram de 1%, 2% e 3% de borracha em relação à massa total de agregados. Nas misturas betuminosas de controlo sem borracha foi usado betume modificado com polímeros, PG76. Nas misturas betuminosas modificadas com borracha foi utilizado o betume convencional de penetração nominal 80/100. Deste estudo concluiu-se o seguinte (Hassan et al. 2013):

- Dos ensaios de *Marshall* verificou-se que, com a adição de granulado de borracha, houve uma redução da estabilidade e da rigidez das misturas betuminosas.
- As misturas betuminosas densas com borracha apresentaram melhor resistência à deformação permanente que a mistura betuminosa de controlo sem borracha.
- Nas misturas betuminosas descontínuas com borracha, embora o comportamento à deformação permanente melhore com o aumento da quantidade de borracha adicionada, não se verificou uma melhoria da resistência à deformação permanente em relação à mistura betuminosa de controlo sem borracha.
- Uma hora de interação entre o betume e a borracha não permitiu melhorar as propriedades do ligante de forma a que este apresentasse um desempenho tão bom como o do betume modificado com polímeros.

Para perceber a influência da interação entre o betume e a borracha no desempenho das misturas betuminosas com borracha adicionada por via seca, investigadores da Universidade de Salamanca e da Universidade Politécnica de Madrid, Espanha, realizaram um conjunto de observações ao microscópio de fluorescência tanto à mistura simples de betume e granulado de borracha (sem os agregados minerais), como à mistura betuminosa com incorporação de granulado de borracha no seu todo. Para além das observações ao microscópio de fluorescência, foi avaliada a rigidez e a resistência à deformação permanente de misturas betuminosas com e sem borracha. Este estudo permitiu obter um conjunto de conclusões que se descrevem seguidamente (López-Moro et al. 2013).

Na mistura simples de betume e granulado de borracha, na observação microscópica, foi observada a transferência de negro de fumo da borracha para o betume, que deu ao betume uma aparência mais escura, e o aparecimento, em torno das partículas de borracha, de áreas

com fluorescência amarela que foram formadas, provavelmente, devido à absorção de óleos aromáticos do betume pelas partículas da borracha durante o processo de interação betume-borracha. Como consequência do processo de interação, os componentes mais voláteis do betume foram transferidos para a borracha, originando um betume mais viscoso (Figura 2.21).

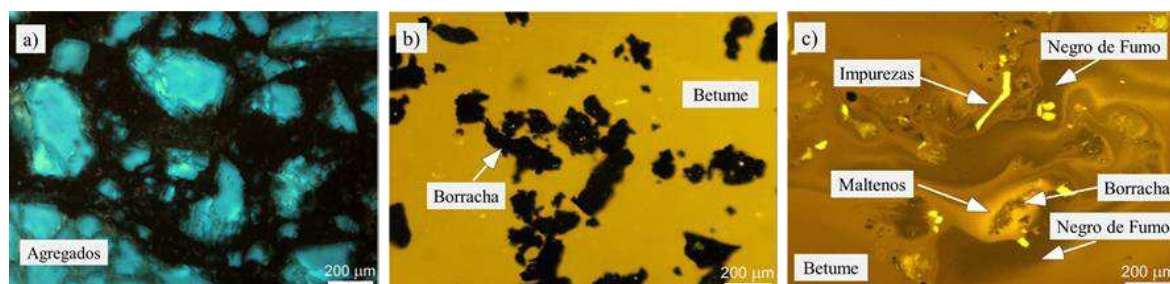


Figura 2.21 – Observação, ao microscópio de fluorescência, de amostras de: (a) betume e agregados; (b) betume e borracha, antes da digestão; (c) betume e borracha, decorrido o tempo de digestão de 2h. Adaptado de López-Moro et al. (2013)

Na mistura betuminosa com borracha, provavelmente devido à presença de filler mineral e à menor quantidade de betume a envolver a borracha, a transferência de negro de fumo da borracha para o betume e o aparecimento de áreas com fluorescência amarela, em torno das partículas de borracha, não foi tão evidente como na mistura simples de betume e borracha. Contudo, a existência de interação entre o betume e o granulado de borracha das misturas betuminosas com borracha, adicionada por via seca, pôde ser explicado pelas seguintes observações:

- Aparecimento de áreas mais escuras no ligante betuminoso das misturas com granulado de borracha face às misturas betuminosas sem borracha.
- Aparecimento de áreas de fluorescência amarela em algumas partículas de borracha, revelando que essas partículas incorporaram maltenos do betume.
- Aparecimento de filler mineral junto das partículas de borracha, podendo tal ser explicado pela formação de uma película de gel em volta das partículas de borracha, relacionada com a transferência de maltenos do betume para a borracha, permitindo a ligação dessas partículas ao filler.
- Reduzida porosidade em volta das partículas de borracha, também devido à formação da película de gel em torno da borracha.

Verificou-se, neste estudo, que a interação entre o betume convencional de penetração nominal 50/70 e as partículas de borracha é mais favorável para partículas de tamanho máximo de 0,2 mm. Este processo de melhoria das propriedades do ligante necessitou de um tempo de interação entre o betume e a borracha de 2 horas à temperatura de 170°C (Figura 2.22).

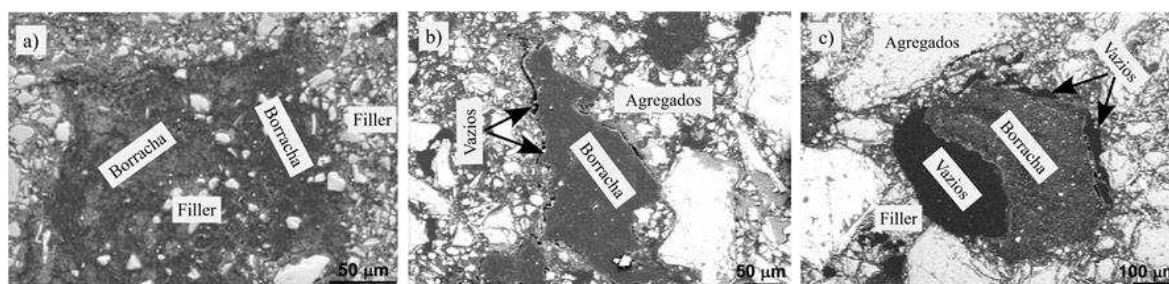


Figura 2.22 – Observação, ao microscópio eletrónico de varrimento, da mistura betuminosa com borracha, adaptado de López-Moro et al. (2013). (a) Tempo de digestão de 2 h. (b) Sem tempo de digestão. (c) Tempo de digestão de 2 h e partículas de borracha maiores (0,55 mm).

De forma resumida e de acordo com o Quadro 2.5 que sumariza os resultados dos ensaios dinâmicos de compressão, realizados com o equipamento MTS 810 do Centro de Estudos e Experimentação das Obras Públicas de Madrid (CEDEX), neste estudo demonstrou-se que a absorção de parafina e de maltenos, do betume, pelas partículas de borracha e a transferência de negro de fumo da borracha para o betume, resultou numa mistura betuminosa melhorada, com maior rigidez (maior valor do módulo de deformabilidade) e melhor resistência à deformação permanente (parâmetro de deformação permanente mais elevado) face a misturas betuminosas sem borracha, fabricadas com betume convencional ou com betume modificado com polímeros SBS.

Quadro 2.5 – Parâmetros de fadiga e de deformação permanente a 20°C e a 10Hz, López-Moro, et al. (2013)

Betão Betuminoso	Betume 50/70 (mistura de referência)	Betume 16/60 (modificado com polímeros SBS)	Betume 50/70 + Borracha
Módulo de Deformabilidade (MPa)	4950	4000	6500
Ângulo de Fase (°)	21,8	21,7	18,7
Parâmetro Def. Permanente (MPa)	13,329	10,818	20,273
Parâmetro Fadiga (MPa)	1838	1478	2083

Procurando inferir acerca da aplicabilidade das misturas betuminosas com borracha, adicionada por via seca, às estradas Portuguesas apresenta-se, de seguida e de forma resumida, o trabalho desenvolvido por Feiteira-Dias et al. (2014). Neste estudo é avaliada a resposta mecânica de misturas betuminosas rugosas com borracha, fabricadas pelo processo seco. O desempenho destas misturas betuminosas foi comparado com o desempenho de uma mistura betuminosa rugosa sem borracha, considerada de referência, e com o desempenho de misturas betuminosas rugosas fabricadas pelo processo húmido. As misturas betuminosas foram produzidas em central e aplicadas em trechos experimentais da estrada nacional EN370, de onde foram recolhidas amostras para a análise laboratorial. A avaliação mecânica das misturas betuminosas foi levada a cabo através de ensaios de flexão em quatro pontos, *four-point bending tests*, e de ensaios de deformação permanente, *wheel-tracking tests*.

Neste estudo foi utilizado um processo a seco diferente, que recorreu a partículas de borracha mais finas do que as habitualmente usadas, ou seja, partículas de tamanho nominal entre 0 e 0,6 mm, tamanho normalmente adotado no processo húmido em Portugal. Quanto às misturas betuminosas, foram testadas duas misturas betuminosas com borracha adicionada por via seca (misturas TB3 e TA), e uma mistura betuminosa de referência sem borracha (TB0). Apresenta-se, no Quadro 2.6, as curvas granulométricas do granulado de borracha e dos agregados das misturas betuminosas TB0, TB3 e TA. O tempo de interação mínimo, entre o betume e a borracha, foi de 90 minutos para a mistura TB3 e de 140 minutos para a mistura TA. A interação ocorreu durante a mistura dos materiais, na central, e ao longo do transporte da central para o local de pavimentação.

Quadro 2.6 – Curvas granulométricas dos agregados e do granulado de borracha (percentagem, em massa, de passado acumulado), Feiteira-Dias et al. (2014)

Malha dos Peneiros (mm)	TB0 (mistura de referência)	TB3 (1,5% de borracha)	TA (1,9% de borracha)	Granulado de Borracha
20	100	100	100	-
14	88,1	82,4	97	-
10	73,5	66,5	81	-
8	61,2	55,1	69	-
4	30,3	27,5	36	-
2	18,1	17,9	18	100
0,5	9,9	10,1	10	-
1,18	-	-	-	100
0,6	-	-	-	98,1
0,3	-	-	-	26,4
0,125	6,0	6,4	6	-
0,075	-	-	-	0,3
0,063	4,1	4,4	4	-

No Quadro 2.7, apresentam-se as composições e as temperaturas de fabrico das misturas betuminosas estudadas.

Quadro 2.7 – Composições e temperaturas de fabrico das misturas betuminosas, Feiteira-Dias et al. (2014)

Misturas Betuminosas	TB0	TB3	TA
Temperatura dos Agregados (°C)	165-170	210	165-170
Temperatura do Betume (°C)	150-155	150-155	155-160
Temperatura da Mistura (°C)	160-165	190-195	165-170
Percentagem de Betume (%)	5,0	9,0	8,6
Percentagem de borracha por massa de betume (%)	-	17,0	21,8

Para a avaliação do módulo de deformabilidade e do comportamento à fadiga das misturas betuminosas, foram serradas vigas de 420x60x60 mm³, a partir das lajes provenientes dos trechos experimentais da estrada nacional EN370, e submetidos a ensaios de flexão em quatro pontos. Para a avaliação da deformação permanente, através do ensaio *Wheel Tracking*, foram utilizadas lajes de 300x300x50 mm³, também obtidas dos trechos experimentais. Para as misturas betuminosas com e sem borracha, às temperaturas de 20°C

e de 30°C, apresentam-se, na Figura 2.23, as linhas de fadiga que derivaram da análise de regressão aos ensaios de flexão em quatro pontos.

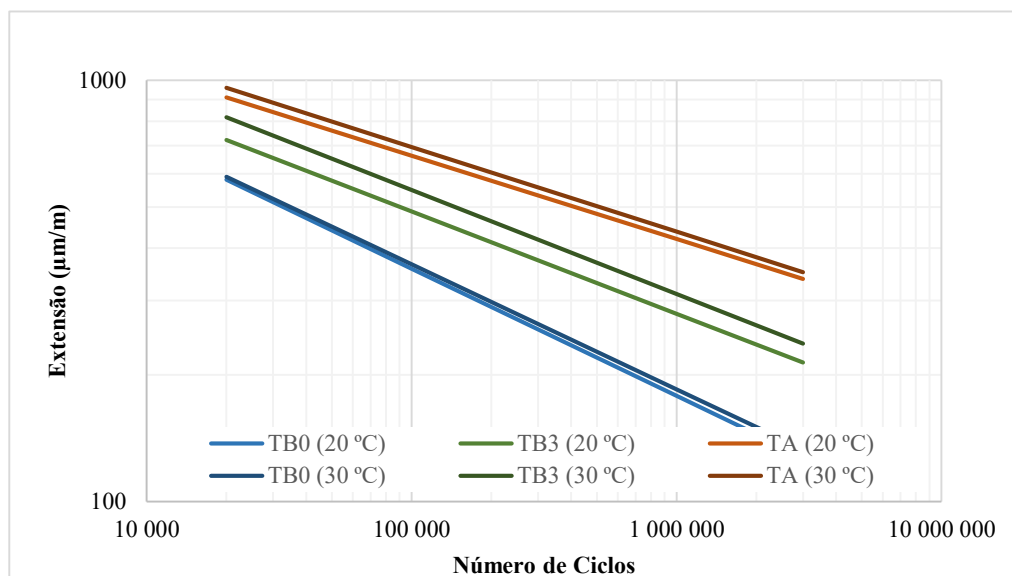


Figura 2.23 – Linhas de fadiga a 20°C e a 30°C, adaptado de Feiteira-Dias et al. (2014)

Também para as misturas betuminosas com e sem borracha, às temperaturas de 50°C e 60°C, e para dois diferentes níveis de carga (700 kPa e 900 kPa), apresentam-se, na Figura 2.24, as curvas de deformação do ensaio *Wheel Tracking*.

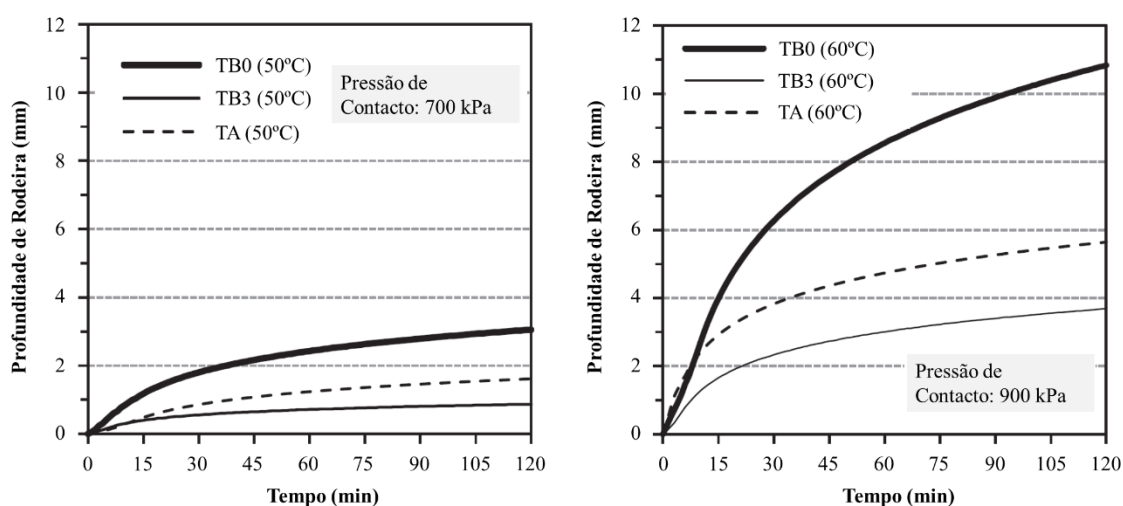


Figura 2.24 – Curvas do ensaio *Wheel Tracking*, adaptado de Feiteira-Dias et al. (2014)

Para melhor perceber o comportamento das misturas betuminosas com e sem borracha à deformação permanente, para além das curvas do ensaio *Wheel Tracking*, mostradas na

Figura 2.24, apresentam-se, no Quadro 2.8, os valores da variação da profundidade de rodeira - *rate of rut depth* ($R_{rd-105/120}$) e da profundidade de rodeira total após 120 minutos - *total rut depth after 120 min* (R_{d-120}).

Quadro 2.8 – Variação da profundidade de rodeira ($R_{rd-105/120}$) e profundidade de rodeira total (R_{d-120}), Feiteira-Dias et al. (2014)

Misturas	TB0	TB3	TA	TB0	TB3	TA
Temperatura (°C)	50			60		
Pressão de Contacto (kPa)	700			900		
$R_{rd-105/120}$ (10^{-3} mm/min)	8,2	1,8	4,9	29,3	8,7	11,7
R_{d-120} (mm)	3,05	0,87	1,62	10,83	3,68	5,64

Como principais conclusões do estudo efetuado por Feiteira-Dias et al. (2014) às misturas betuminosas com partículas de borracha ultrafinas adicionadas por via seca, destacou-se o seguinte:

- As misturas betuminosas rugosas fabricadas com granulado de borracha fino, produzido a partir de pneus em fim de vida, quando comparadas com misturas betuminosas semelhantes, sem incorporação de borracha, possuem melhores propriedades para aplicação em pavimentos rodoviários.
- Apesar do granulado de borracha ter sido adicionado aos agregados para produzir a mistura betuminosa com borracha por via seca, o betume-borracha TB3, após recuperação, revelou maior viscosidade que o betume TB0, utilizado como ligante de base a ambas as misturas betuminosas. Tal foi devido à migração de algumas frações leves do betume para a borracha durante o tempo de interação entre o betume e a borracha.
- Da comparação com resultados de estudos de outros autores, verificou-se que as misturas betuminosas obtidas pelo processo seco apresentam um comportamento idêntico às misturas obtidas pelo processo húmido, tendo um desempenho melhorado ao fendilhamento por fadiga, o que está relacionado com a alta percentagem de betume utilizada e com a presença de borracha nas mesmas.
- A utilização de temperaturas, na central de produção, acima dos 190°C durante a produção de misturas betuminosas com borracha, adicionada por via seca, pareceu comprometer a contribuição da borracha na melhoria do desempenho das misturas

(redução do módulo de deformabilidade a temperaturas intermédias e menor resistência à fadiga).

- No que respeita ao comportamento à deformação permanente, em relação à mistura de referência sem borracha (TB0), verificou-se uma baixa suscetibilidade à temperatura das misturas betuminosas com borracha (TB3 e TA).

Hassan et al. (2015), efetuaram um estudo laboratorial que visou a caracterização das propriedades microestruturais das misturas betuminosas com borracha adicionada por via seca. Para além de uma mistura betuminosa de controlo, sem borracha, foram analisadas misturas betuminosas com diferentes percentagens e tamanhos de granulado de borracha. No que respeita à quantidade de borracha, foram consideradas misturas com 2% e com 3% de borracha em relação à massa total de agregados. Em termos de granulometria da borracha, para cada percentagem de borracha, foram consideradas misturas com granulado de borracha fino (1 a 3 mm) e com granulado de borracha grosseiro (5 a 6 mm). O betume utilizado em ambas as misturas foi o betume convencional de penetração nominal 100/150.

Para o estudo efetuado por Hassan et al. (2015), para cada uma das cinco misturas betuminosas (sem borracha, com 2% e 3% de granulado de borracha fino, e com 2% e 3% de granulado de borracha grosseiro) e com recurso ao compactador giratório, foram produzidos provetes betuminosos com 100 mm de altura e 100 mm diâmetro. Estes provetes foram digitalizados utilizando o processo de tomografia computadorizada – *X-ray Computed Tomography* (CT), e, juntamente com a técnica de análise de imagens - *Image Analysis Technique*, foram avaliados os efeitos do tamanho e da quantidade das partículas de borracha na quantidade de vazios e na distribuição do granulado de borracha nos mesmos provetes.

A análise destas misturas betuminosas revelou que a distribuição das partículas de borracha foi afetada, tanto pela sua granulometria como pela sua quantidade. Como se mostra na Figura 2.25, as partículas de borracha ficaram bem distribuídas ao longo da altura dos provetes. As partículas mais finas apareceram distribuídas aleatoriamente no mástique e em torno dos agregados, enquanto que as partículas mais grosseiras apareceram juntas em aglomerados (Figura 2.26). Quanto à percentagem de borracha, o aumento evidenciou a tendência das partículas de borracha formarem manchas no interior da amostra.

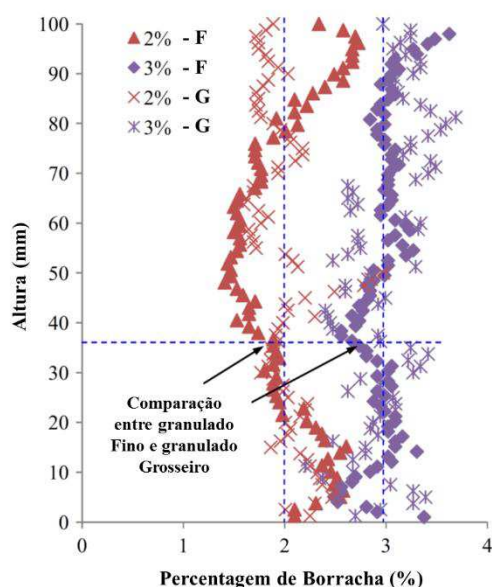


Figura 2.25 – Distribuição do granulado de borracha nos provetes, adaptado de Hassan et al. (2015)

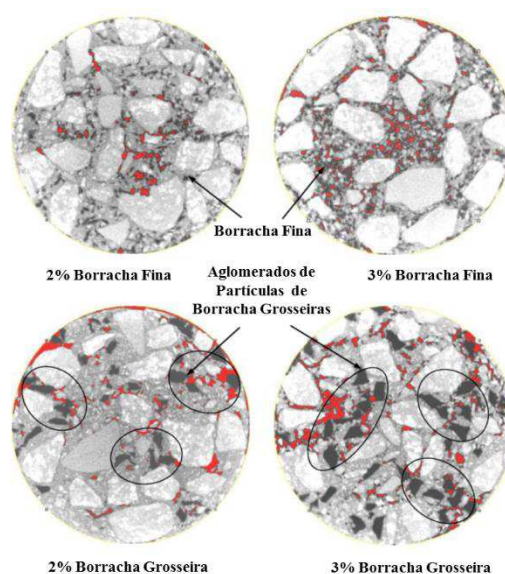


Figura 2.26 – Imagens Raios X dos provetes das misturas betuminosas, à altura de 35 mm, adaptado de Hassan et al. (2015)

Em relação à presença de vazios na mistura, o estudo evidenciou que o aumento da quantidade de borracha afetou a sua formação e distribuição. Nas misturas betuminosa com borracha a distribuição dos vazios foi praticamente homogênea, com vazios dispersos por toda a secção transversal analisada dos provetes, enquanto que na mistura betuminosa de controlo os vazios concentraram-se próximo das extremidades do provete (Figura 2.27). Os provetes com granulado fino de borracha, em comparação com os provetes com granulado grosso de borracha e com os provetes sem borracha, produziram vazios de dimensão inferior (Figura 2.27). Para além disto, a forma dos vazios formados foi mais alongada para as quantidades de borracha mais elevadas.

De forma resumida, o estudo efetuado por Hassan et al. (2015) concluiu que as partículas de borracha afetam a eficácia da compactação das misturas betuminosas e tendem a fazer com que os vazios se dispersem aleatoriamente, em tamanhos menores. Este efeito foi mais evidente nos provetes com granulado de borracha fino.

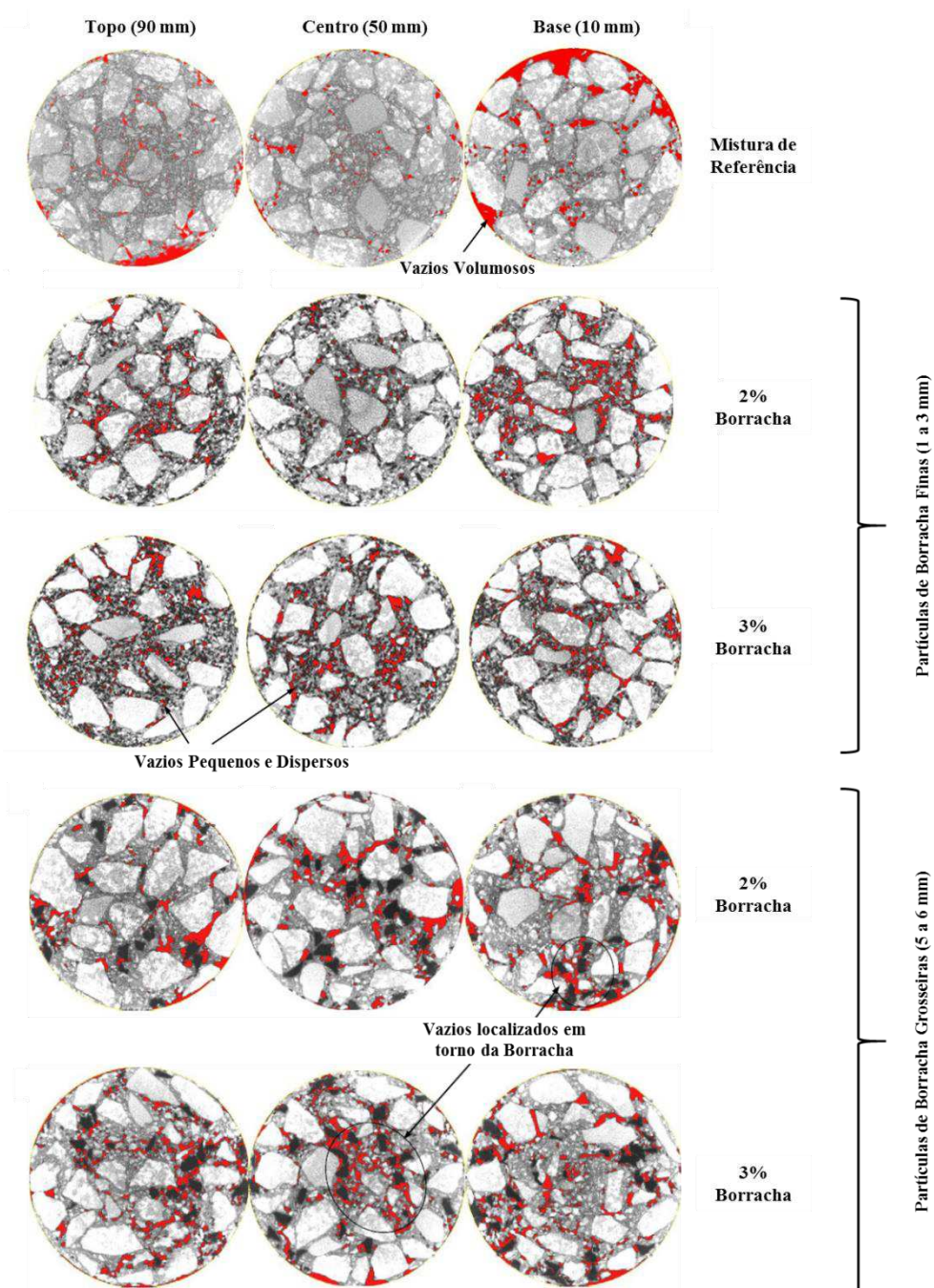


Figura 2.27 – Distribuição de vazios nos provetes, mostrada a vermelho pelas Imagens Raios X, adaptado de Hassan et al. (2015)

2.6 Comparação do Desempenho no Processo Seco e no Processo Húmido

No ponto anterior foi mencionado o trabalho de Feiteira Dias et al. (2014), que avaliou a resposta mecânica de misturas betuminosas rugosas com borracha (partículas ultrafinas de tamanho nominal entre 0 e 0,6 mm), fabricadas pelo processo seco, nomeadamente, uma mistura designada de TB3 (interação betume borracha: mínimo de 90 min) e outra mistura designada de TA (interação betume borracha: mínimo de 140 min).

Aqui, também de acordo com o estudo efetuado por Feiteira Dias et al. (2014), apresenta-se a comparação entre a resposta mecânica das misturas betuminosas com borracha adicionada por via seca, TB3 e TA, e de um conjunto de misturas betuminosas com borracha adicionada por via húmida estudadas por outros autores, nomeadamente: Antunes et al. (2000); Fontes et al. (2006); Oliveira et al. (2013); e Moreno et al. (2013).

No Quadro 2.9 são apresentadas as características gerais das misturas betuminosas com borracha adicionada por via húmida, cujo desempenho foi comparado com o desempenho das misturas betuminosas com borracha adicionada por via seca (TB3 e TA).

Quadro 2.9 – Características gerais das misturas betuminosas com borracha adicionada por via húmida, Feiteira Dias et al. (2014)

Estudo	Tipo de mistura/temperatura mistura (°C)	Tipo de betume/ percentagem	Percentagem de borracha por massa de betume/ tipo de borracha/ tamanho máximo	Porosidade (%)
Oliveira et al. (2013)	Densa/ 160	Pen 55–70/ 4.5%	21/ criogénica/ 0,6 mm	4,3
Moreno et al. (2013)	BBTM 11A/ 180	Pen 50–70/ 4.75%	20/ N.D./ 0,6 mm	N.D.
Fontes et al. (2006)	Rugosa/ N.D.	Pen 35–50/ 8.5%	20/ ambiente/ 0,6 mm	6,0
Antunes et al. (2000)	Rugosa/ 180	Pen 50–70/ 7.0%	18/ criogénica/ 0,6 mm	N.D.

Na Figura 2.28, apresenta-se a comparação dos módulos de deformabilidade das misturas betuminosas com borracha adicionada por via seca (TB3 e TA) e por via húmida (restantes).

A obtenção dos módulos de deformabilidade foi efetuada nas mesmas condições do ensaio de flexão em quatro pontos.

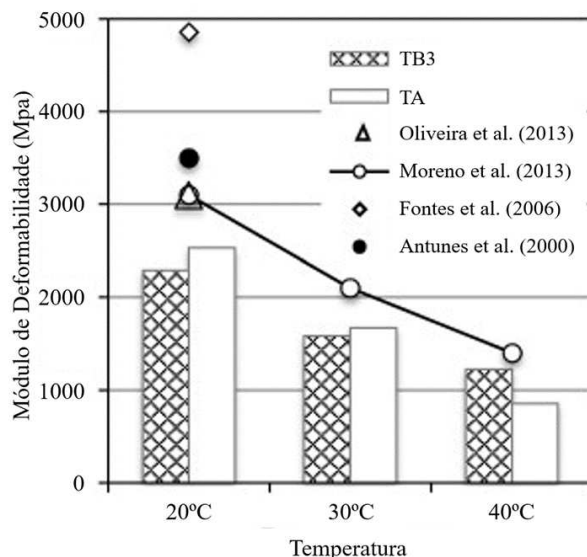


Figura 2.28 – Comparação dos módulos de deformabilidade das misturas obtidas pelo método seco e pelo método húmido, Feiteira Dias et al. (2014)

Na Figura 2.29, apresenta-se uma análise comparativa do comportamento à fadiga (parâmetro ϵ_6) das misturas betuminosas com borracha adicionada por via seca (TB3 e TA) e por via húmida (restantes). A comparação foi efetuada para as mesmas condições do ensaio de flexão em quatro pontos.

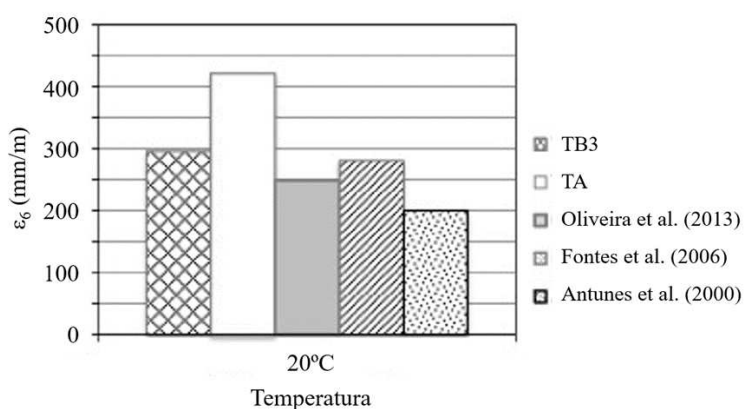


Figura 2.29 – Comportamento à fadiga das misturas obtidas pelo método seco e pelo método húmido, Feiteira Dias et al. (2014)

Na Figura 2.30, apresenta-se a comparação do comportamento à deformação permanente das misturas betuminosas com borracha adicionada por via seca (TB3 e TA) e por via húmida (restante). A comparação foi efetuada para as mesmas condições do ensaio *Whell Tracking*.

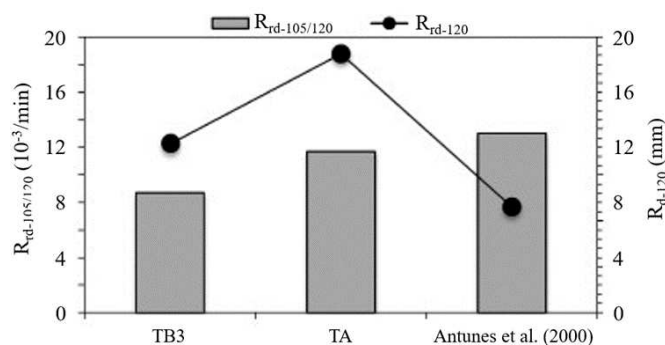


Figura 2.30 - Comportamento à deformação permanente das misturas obtidas pelo método seco e pelo método húmido, Feiteira Dias et al. (2014)

Desta análise comparativa, verificou-se que as misturas betuminosas obtidas pelo processo seco, em comparação com as misturas betuminosas obtidas pelo processo húmido, apresentaram propriedades mecânicas satisfatórias. Embora as misturas betuminosas obtidas pelo processo húmido tenham composições diferentes e sejam bastante variáveis na sua natureza, estas podem representar as características típicas das misturas betuminosas com borracha utilizadas na pavimentação de estradas. Desta forma, estas misturas foram utilizadas para a comparação das suas propriedades mecânicas com as propriedades mecânicas das misturas betuminosas com borracha obtidas pelo processo seco (TB3e TA).

No que se referiu ao módulo de deformabilidade (Figura 2.28), as misturas obtidas pelo processo seco apresentaram valores ligeiramente mais baixos que as misturas obtidas pelo processo húmido. Tal diferença não constituiu um problema pois a resistência à fadiga (Figura 2.29) e à deformação permanente (Figura 2.30) foi, no mínimo, semelhante para as misturas obtidas pelo processo seco e para as misturas obtidas pelo processo húmido. Realçou-se o desempenho melhorado ao fendilhamento por fadiga das misturas betuminosas obtidas pelo processo seco. Desta forma, da comparação com resultados de estudos de outros autores, verificou-se que as misturas betuminosas obtidas pelo processo seco apresentam um comportamento idêntico às misturas obtidas pelo processo húmido.

3 MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO EMPÍRICO-MECANICISTA DA AASHTO

3.1 Enquadramento

Com o desenvolvimento de novos materiais de pavimentação é cada vez mais importante a adoção de metodologias de dimensionamento que tenham em consideração, tanto as características destes novos materiais, como o seu desempenho ao longo da vida útil do pavimento. Desta forma, neste capítulo, faz-se uma descrição do método de dimensionamento empírico-mecanicista da AASHTO – MEPDG.

3.2 Descrição do MEPDG

A *American Association of State Highway and Transportation Officials* - AASHTO desenvolveu um novo método de dimensionamento de pavimentos rodoviários, designado por *Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide* – MEPDG (AASHTO 2008), em substituição do antigo método de dimensionamento de 1993 (AASHTO 1993). Este é um método de dimensionamento empírico-mecanicista onde a performance dum pavimento é avaliada pela sua resposta em função de vários parâmetros de estado como a irregularidade longitudinal, as rodeiras, o fendilhamento longitudinal, o fendilhamento transversal e a pele de crocodilo (Simões et al. 2013).

O MEPDG, desenvolvido no projeto NCHRP 1-37A, é um método empírico-mecanicista de dimensionamento e de avaliação de estruturas de pavimentos. A resposta estrutural do pavimento (tensões, extensões e deflexões) é determinada, de forma mecanicista, com base nas propriedades dos materiais, nas condições ambientais e nas características do carregamento. Esta resposta é utilizada como parâmetro de entrada em modelos empíricos para prever o comportamento do pavimento (NCHRP 2004).

O método MEPDG depende de modelos empíricos para prever o comportamento do pavimento através do cálculo das respostas estruturais e das propriedades dos materiais. A precisão destes modelos depende da qualidade da informação de entrada e da calibração dos

modelos empíricos de ruína em função da performance observada em campo. São utilizados dois tipos de modelos empíricos no método MEPDG, um prevê diretamente a ruína do pavimento enquanto que no outro, a previsão do dano é ajustada de acordo com as anomalias observadas no pavimento (por exemplo, o fendilhamento por fadiga nos pavimentos flexíveis).

Seguindo o exposto por Schwartz & Carvalho (2007), no documento *Evaluation of Mechanistic-Empirical Design Procedure* inserido no projeto *NCHRP 1-37A*, far-se-á, de seguida, uma descrição do método MEPDG.

3.2.1 Processo de Dimensionamento

O método MEPDG não é tao simples como o proposto no guia de dimensionamento de pavimentos de 1993 da AASHTO, em que as espessuras das camadas do pavimento eram obtidas diretamente da equação de dimensionamento. Em vez disso, é utilizado um processo iterativo onde a estrutura do pavimento é ajustada em função dos critérios de dimensionamento. O método segue os seguintes passos (Schwartz & Carvalho 2007):

- Pré-dimensionamento de uma estrutura de pavimento para condições específicas de fundação, propriedades dos materiais, tráfego e condições ambientais;
- Definição dos critérios de dimensionamento do pavimento para uma performance aceitável no final do período de vida do mesmo (níveis aceitáveis para a deformação permanente, para o fendilhamento por fadiga, para o fendilhamento devido a variações térmicas e para a irregularidade longitudinal);
- Determinação do tráfego mensal e das condições climáticas sazonais (gradientes térmicos nas camadas de betão betuminoso e teor em humidade das camadas granulares e da fundação);
- Modificação das propriedades dos materiais em função das condições ambientais;
- Cálculo das respostas estruturais (tensões, extensões e deflexões), para cada tipo de eixo e de carga, e para cada intervalo de tempo, durante todo o período de dimensionamento;
- Cálculo do dano previsto (por exemplo, a deformação permanente e o fendilhamento), no final de cada intervalo de tempo, durante o período de dimensionamento, recorrendo aos modelos empíricos calibrados de previsão de desempenho;

- Avaliação do desempenho previsto no pré-dimensionamento em função do fator de segurança especificado. Se o pré-dimensionamento não cumprir os critérios de desempenho, a estrutura deve ser modificada (espessuras ou materiais diferentes) e os cálculos repetidos até atingir os critérios de desempenho.

Este método está implementado num software no qual os passos descritos anteriormente, com a exceção da estrutura do pavimento e da seleção dos materiais, são realizados automaticamente.

O método MEPDG recorre a uma abordagem hierárquica, para os parâmetros de entrada, baseada na qualidade dos dados disponíveis e na sua importância para o dimensionamento. Existem, portanto, três níveis para os parâmetros de entrada (Schwartz & Carvalho 2007):

- Nível 1 – São necessárias as propriedades laboratoriais dos materiais (por exemplo, a curva do módulo dinâmico das misturas betuminosas e módulo de resiliência não linear para os materiais não ligados). São também necessários dados específicos de tráfego (por exemplo, a classe dos veículos e a distribuição de carga);
- Nível 2 – Os parâmetros de entrada são obtidos por meio de correlações empíricas com outros parâmetros (por exemplo, o módulo de resiliência estimado em função do valor de CBR);
- Nível 3 – Os parâmetros de entrada são selecionados a partir de valores standard de uma base de dados, nacional ou regional, de acordo com o tipo de materiais e com o tipo de estrada (por exemplo, a classificação de solos para determinar o intervalo de variação do módulo resiliente e o tipo de estrada para determinar a distribuição do tráfego).

De acordo com o projeto NCHRP 1-37A o nível 1 é recomendado para estradas de tráfego intenso, onde uma falha prematura do pavimento é economicamente indesejável. O nível 2 pode ser utilizado em projetos intermédios, enquanto que o nível 3 é recomendado para projetos menores, geralmente estradas de tráfego reduzido (Schwartz & Carvalho 2007).

O software do método MEPDG recorre à teoria linear elástica de multicamada (MLET - *Multi Layer Linear Elastic Theory*) para prever as respostas mecanicistas na estrutura do pavimento. Quando os materiais não ligados são caracterizados por módulos de resiliência não lineares (nível 1) o MLET não é apropriado, sendo utilizado um método de elementos finitos (FEM - *Finite Element Method*).

3.2.2 Critérios de Dimensionamento

O critério de dimensionamento é definido com base na magnitude das anomalias no pavimento que originam um nível de serviço mínimo aceitável. São definidos os parâmetros de entrada que variam em função do tipo de estrada, da localização, da importância do projeto e das condicionantes económicas.

As anomalias consideradas para os pavimentos flexíveis são: a deformação permanente (rodeiras); o fendilhamento por fadiga (pele de crocodilo); o fendilhamento longitudinal; o fendilhamento transversal (devido aos gradientes térmicos); e a irregularidade longitudinal. A única anomalia funcional considerada é a irregularidade longitudinal. O atrito não é considerado no método MEPDG. De todas estas anomalias, a irregularidade longitudinal é a única anomalia que não se pode prever através de respostas mecanicistas das camadas do pavimento. As previsões da irregularidade longitudinal têm em consideração outras anomalias funcionais e fatores locais (Schwartz & Carvalho 2007).

3.2.3 Parâmetros de Entrada do Dimensionamento

3.2.3.1 Tráfego

O software MEPDG recorre a um espectro de carga por cada tipo de eixo, obtido através de campanhas de pesagens em movimento. Este solicita a introdução: do tráfego nos dois sentidos; do número de vias; da percentagem de pesados em cada sentido; e da percentagem de pesados na via de dimensionamento. O software considera 13 classes de veículos (classe 1 a classe 13), sendo as 3 primeiras referentes a veículos ligeiros e as restantes 10 aos veículos pesados.

É solicitado para, cada classe de veículos pesados, a percentagem do total de pesados, a taxa de crescimento, os fatores de distribuição mensal e os fatores de distribuição horária. Para os veículos pesados, são também solicitados alguns dados técnicos, nomeadamente a largura dos veículos pesados, a distância entre eixos, a distância entre o rodado duplo e a pressão dos pneus (Simões et al. 2013; Marques Almeida & Picado-Santos 2015).

Em Portugal as classes dos veículos são diferentes. Existem 11 classes, de A a K. Os velocípedes estão enquadrados nas classes A e B, os veículos ligeiros enquadram-se nas classes C, D e E, e os veículos pesados fazem parte das restantes classes, F, G, H, I, J e K. De forma a obter uma conversão o mais ajustada possível, as classes devem agrupar-se da

seguinte maneira: a classe F correspondente a veículos pesados sem reboque distribui-se pelas classes 5, 6 e 7; a classe G relativa a camiões com um ou mais reboques distribui-se pelas classes 11, 12 e 13; a classe H representando tratores com semirreboques distribui-se pelas classes 8, 9 e 10; a classe I relativa a autocarros passa diretamente para a classe 4; as classes J e K correspondentes a tratores agrícolas e veículos especiais não têm uma relação direta com as classes do software, algo que não será significativo uma vez que o tráfego deste tipo de veículos é praticamente inexistente (Simões et al. 2013).

3.2.3.2 *Condições climáticas*

Os dados referentes às condições climáticas são os mais difíceis de obter e formatar do modo requerido pelo MEPDG. Os dados, horários, necessários ao método MEPDG são: a temperatura do ar; a precipitação; a velocidade do vento; a exposição solar; e a humidade relativa. Nos Estados Unidos existem centenas de estações meteorológicas que têm todos os dados necessários no formato utilizado pelo software MEPDG (Li et al. 2010). Esses dados são agregados e analisados no MEPDG através de um modelo designado *Enhanced Integrated Climate Model* - EICM.

Para além dos dados ambientais referidos anteriormente, é ainda necessário, conhecer a profundidade do nível freático e características da drenagem do pavimento.

Em Portugal os métodos de dimensionamento recorrem ao conceito de temperatura de serviço (Picado-Santos 2000), não existindo ficheiros de dados climáticos no formato requerido pelo software MEPDG. Simões et al. (2013), com o intuito de aplicar a Portugal o novo método de dimensionamento de pavimentos rodoviários da AASHTO, efetuaram uma recolha exaustiva de todos os dados disponíveis no Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA) e procederam à formatação dos mesmos de forma a permitir a sua leitura e análise pelo software MEPDG. Foram recolhidos dados da temperatura, da precipitação e da velocidade do vento em todas as horas de um ano. Posteriormente estes dados, incluindo outros, foram formatados tendo em consideração um ficheiro existente do tipo *Integrated Climatic Model* (ICM).

3.2.3.3 *Propriedades dos materiais*

O método MEPDG requer um grande conjunto de propriedades dos materiais. Os três modelos de dimensionamento que requerem as propriedades dos materiais são os modelos climáticos, os modelos de resposta do pavimento e os modelos de ruína.

Misturas betuminosas

O módulo de deformabilidade dinâmico, $|E^*|$, é o principal parâmetro de entrada para as misturas betuminosas. Este depende das características da mistura (por exemplo: tipo e percentagem betume; granulometria dos agregados; e características volumétricas), da taxa de carregamento, da temperatura e da idade.

Para os parâmetros de entrada do nível 1, a curva do módulo de deformabilidade dinâmico é construída, laboratorialmente, com base em princípios de sobreposição de tempo e temperatura, fazendo variar a frequência de aplicação de carga (Huang 2004). Para o nível 1 é, ainda, necessária a medição da viscosidade do betume através da utilização do reómetro de corte dinâmico, DSR - *Dynamic Shear Rheometer*. Os efeitos do envelhecimento do betume são simulados utilizando um sistema de envelhecimento global - *Global Aging System*, que considera o efeito do envelhecimento a curto prazo, mistura e compactação dos materiais, e a longo prazo, oxidação do betume (NCHRP 2004; Schwartz & Carvalho 2007).

Para os níveis 2 e 3, a curva do módulo de deformabilidade dinâmico é obtida através de uma relação empírica que depende de propriedades da mistura betuminosa como, por exemplo, a percentagem em betume, a viscosidade do betume e a granulometria da mistura betuminosa (Schwartz & Carvalho 2007).

Materiais não ligados

No dimensionamento de misturas betuminosas, a principal propriedade dos materiais não ligados é o módulo de resiliência.

Para os parâmetros de entrada de nível 1, o módulo de resiliência é determinado laboratorialmente. No nível 2, o módulo de resiliência é correlacionado com parâmetros como o CBR, o *R-Value*, ou o coeficiente de camada da AASHTO. No nível 3, o módulo resiliente pode ser escolhido a partir de bases de dados com intervalos de valores típicos para

cada material. Para ambos os níveis, o módulo resiliente é determinado para uma baridade máxima e para um teor em água ótimo.

O coeficiente de *Poisson* é, também, um dos parâmetros necessários ao dimensionamento. Este pode ser determinado por ensaios laboratoriais, por correlações com outras propriedades, ou através de intervalos de valores típicos. Os limites de Atterberg, a granulometria, a condutividade hidráulica, o peso volúmico seco máximo, a massa específica, o teor em água ótimo e o grau de saturação são parâmetros de entrada adicionais necessários para a determinação do efeito das variações sazonais do clima no módulo resiliente das camadas não ligadas (Schwartz & Carvalho 2007).

3.2.4 Modelos de Resposta do Pavimento

O método MEPDG recorre a três modelos para prever a resposta estrutural do pavimento. Os modelos de multicamada (MLET - *Multi Layer Linear Elastic Theory*) e os modelos de elementos finitos (FEM - *Finite Element Method*) são usados para as respostas estruturais do pavimento devidas ao carregamento gerado pelo tráfego. O historial de temperatura e humidade na estrutura do pavimento é previsto no modelo *Enhanced Integrated Climate Model* - EICM.

As respostas estruturais do pavimento são calculadas nos pontos onde as solicitações impõem o máximo dano. A resposta do pavimento, em cada ponto, é avaliada a várias profundidades, sendo utilizado o valor mais crítico para prever a performance do mesmo (Schwartz & Carvalho 2007).

Cada camada do pavimento é dividida em subcamadas mais delgadas de forma a que as propriedades que variam na direção vertical sejam mais bem representadas (por exemplo: a temperatura, e conseqüentemente o módulo de deformabilidade, das camadas betuminosas varia em função da profundidade das mesmas).

3.2.4.1 Modelos de multicamada - MLET

O modelo MLET é aplicado recorrendo a uma versão modificada do algoritmo do programa JULEA. É utilizado o princípio de sobreposição, onde eixos simples podem ser combinados de forma a formar eixos de várias rodas, simulando o efeito das diferentes configurações dos eixos que solicitam o pavimento (NCHRP 2004).

A pequena quantidade de parâmetros de entrada requerida pelo modelo MLET facilita a sua implantação e utilização. Os únicos parâmetros de entrada necessários são a espessura das camadas, as propriedades (módulo de deformabilidade e coeficiente de Poisson) de cada camada, a pressão e a área de contacto dos pneus com o pavimento. A principal desvantagem do modelo MLET é o facto de não considerar as propriedades não lineares exibidas por alguns materiais de pavimentação (Schwartz & Carvalho 2007).

3.2.4.2 Modelos de elementos finitos - FEM

Os modelos de elementos finitos, *Finite Element Method* – FEM, permitem a modelação estrutural de secções de pavimento multicamada com propriedades dos materiais que podem variar tanto verticalmente como horizontalmente ao longo das mesmas secções. Os FEM conseguem considerar, para além de outros recursos, geometrias tridimensionais, o comportamento não linear dos materiais, carregamentos dinâmicos e não-linearidades constitutivas (Almeida & Picado-Santos 2012).

O princípio geral da técnica de elementos finitos consiste em particionar o problema em pequenos elementos discretos (malha), formular uma aproximação para as variações da extensão e da tensão através de cada elemento individual e, de seguida, aplicar requisitos de equilíbrio para combinar os elementos individuais obtendo, em termos dum conjunto de simultâneas equações lineares, a formulação para o problema global. A solução encontrada no modelo de elementos finitos, FEM, é uma aproximação à solução real. No MEPDG o FEM foi implementado considerando o seguinte (Schwartz & Carvalho 2007):

- Comportamento elástico linear para o betão betuminoso;
- Comportamento elástico não linear dos materiais não ligados;
- Camadas completamente ligadas, parcialmente ligadas e completamente desligadas.

3.2.4.3 Modelo ambiental EICM

O modelo EICM é um modelo mecanicista que simula as alterações, provocadas pelas condições climáticas, nas características e no comportamento das camadas do pavimento e da sua fundação. As variações diárias e sazonais da temperatura e da humidade na estrutura do pavimento são inferidas pelo historial meteorológico do local do projeto (NCHRP 2004).

3.2.5 Modelos Empíricos de Desempenho

Aqui, apresenta-se uma descrição dos modelos empíricos, utilizados no método MEPDG, para a previsão do desempenho dos pavimentos flexíveis. Os parâmetros de estado que integram os modelos empíricos são a irregularidade longitudinal, as rodeiras, o fendilhamento longitudinal, o fendilhamento transversal e a pele de crocodilo. A calibração dos modelos empíricos foi feita recorrendo à base de dados LTTP - *Long Term Pavement Performance*, constituída por secções de pavimento distribuídas por todos os Estados Unidos da América (NCHRP 2004; Azevedo et al. 2015).

3.2.5.1 Fendilhamento por fadiga do tipo “pele de crocodilo”

O modelo de avaliação do fendilhamento por fadiga do método MEPDG é o do *Asphalt Institute* (Asphalt-Institute 1991). O número de repetições de carga até à rotura, para cada magnitude de carga, depende de parâmetros da camada betuminosa como o fator de correção da espessura, a extensão de tração no ponto crítico e a rigidez mesma para determinada temperatura. O dano resultante da aplicação de determinada carga é posteriormente convertido em área fendilhada do pavimento.

3.2.5.2 Fendilhamento longitudinal

A formação de fendilhamento longitudinal é similar à formação de fendilhamento por fadiga do tipo “pele de crocodilo” com a nuance deste ser originado pelas extensões de tração que surgem no topo das camadas betuminosas.

O método MEPDG assume, para este tipo de fendilhamento, a mesma formulação do fendilhamento tipo “pele de crocodilo”. A única diferença está na forma de conversão do dano em área fendilhada (Schwartz & Carvalho 2007).

3.2.5.3 Fendilhamento transversal (fendilhamento devido aos gradientes térmicos)

O fendilhamento devido aos gradientes térmicos é uma consequência dos ciclos de aquecimento/arrefecimento que ocorrem nas camadas betuminosas. As fendas devidas aos gradientes térmicos estendem-se transversalmente em toda a largura do pavimento.

O modelo de fendilhamento térmico usado no método MEPDG é uma versão melhorada do modelo TECMODEL desenvolvido no âmbito do programa de investigação SHRP A-005 (Schwartz & Carvalho 2007).

3.2.5.4 Rodeiras

A deformação permanente ou “rodeiras”, nas camadas betuminosas, é uma anomalia provocada pela aplicação repetida de cargas no pavimento aquando este está sujeito a médias/altas temperaturas, apresentando as misturas betuminosas módulos de deformabilidade mais baixos. Esta anomalia desenvolve-se em três fases. Na fase primária, a rodeira desenvolve-se no início de vida do pavimento e é causada, predominantemente, pela densificação da mistura betuminosa provocada pela passagem do tráfego. Na fase secundária a velocidade de deformação é menor e é uma característica própria de cada tipo de mistura betuminosa. Na fase terciária, a velocidade de deformação é elevada, ocorrendo a rotura por corte da mistura betuminosa. Ações de manutenção preventiva e de reabilitação fazem com que, normalmente, a fase terciária não seja atingida em pavimentos em serviço (Schwartz & Carvalho 2007).

A previsão da deformação permanente recorre a modelos empíricos que consideram apenas as fases primária e secundária. Para misturas betuminosas recorre-se ao modelo de Leahy (1989), modificado, primeiro, por Ayres (1997) e, mais recentemente, por Kaloush (2001). Para a avaliação da deformação permanente dos materiais não ligados é utilizado o modelo de Tseng & Lytton (1989) que foi modificado por Ayres e, mais tarde, por El-Basyouny e Witczak (NCHRP 2004).

De acordo com a expressão (3.1), a deformação permanente total, RD_{total} , é o somatório da profundidade de rodeira em todas as camadas do pavimento, nomeadamente a deformação permanente das camadas betuminosas, RD_{MB} , de base, RD_{Base} , e da fundação, $RD_{Fundação}$ (Schwartz & Carvalho 2007):

$$RD_{total} = RD_{MB} + RD_{Base} + RD_{Fundação} \quad (3.1)$$

3.2.5.5 Irregularidade Longitudinal

A irregularidade longitudinal é uma anomalia que influencia fortemente o nível de qualidade global de um pavimento. O aparecimento de qualquer anomalia na superfície do pavimento provoca um aumento da irregularidade longitudinal do mesmo (NCHRP 2004). No projeto

1-37A do NCHRP foi considerado que as deformações permanentes, o fendilhamento transversal e o fendilhamento por fadiga são as anomalias que mais afetam a irregularidade longitudinal do pavimento. Nesse mesmo projeto, também foi observado que as condições ambientais locais e o tipo de bases que suportam as camadas betuminosas também são fatores importantes.

De acordo com a avaliação de mais de 350 seções de pavimento da base de dados LTTP, foram desenvolvidos, para a determinação da irregularidade longitudinal, três modelos para pavimentos flexíveis com diferentes camadas de base: base granular; base estabilizada com cimento; e base tratada com ligante asfáltico (Schwartz & Carvalho 2007).

3.2.6 Fator de Segurança

Os parâmetros de entrada do dimensionamento de pavimentos apresentam grandes incertezas. O projeto baseia-se normalmente em valores médios dos mesmos. O método MEPDG considera que as anomalias no pavimento seguem uma distribuição normal com um valor médio previsto e um correspondente desvio padrão. O desvio padrão da distribuição é estimado com base no erro dos modelos de calibração (Schwartz & Carvalho 2007).

4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL E RESULTADOS

4.1 Enquadramento

Neste trabalho foram produzidas e caracterizadas, em laboratório, misturas betuminosas sem borracha e misturas betuminosas com alta percentagem de borracha (20% de borracha em relação à massa total de ligante betuminoso), utilizando o processo de fabrico por via seca. Este processo de fabrico utilizado é distinto dos dois processos mundialmente mais conhecidos, o *Plus Ride* (FHWA 2005) e o *TAK* genérico (CEDEX 2007), onde o granulado de borracha substitui uma fração do agregado mineral. Foi avaliado o comportamento à fadiga, comportamento à deformação permanente e a evolução da propagação de fendas das misturas betuminosas com e sem borracha.

Desta forma, com este trabalho pretende avaliar-se uma mistura betuminosa rugosa com alta percentagem de borracha adicionada por via seca e verificar se esta apresenta um melhor desempenho estrutural que a mistura betuminosa de referência sem borracha, com um efeito amplificado no que respeita à resistência à progressão de fendilhamento na própria mistura, o que traduz um comportamento que deve ser valorado quando se pretende reabilitar pavimentos com deterioração avançada provocada por aquele tipo de degradação.

No processo de fabrico da mistura betuminosa com borracha, a incorporação de granulado de borracha foi efetuada, não como substituição de parte do agregado, mas sim, de forma a que este fizesse parte da percentagem total de ligante (betume convencional + borracha), de modo equivalente ao que acontece no processo por via húmida. O tempo de interação física entre o betume e a borracha foi garantido através da colocação da mistura betuminosa em estufa, no período que sucedeu à mistura dos seus componentes e antecedeu a sua compactação.

A mistura de referência foi uma mistura do tipo AC14 Surf. A mistura betuminosa rugosa, com alta percentagem de borracha adicionada por via seca, foi denominada por MBR-BA. Esta mistura, com a exceção do processo de adição borracha, é idêntica à mistura betuminosa do tipo MBR-BBA (via húmida).

O fabrico, em laboratório, da mistura MBR-BA teve em consideração os principais procedimentos utilizados em estudos anteriores (Oliver 2000; Visser & Verhaeghe 2000; Feiteira Dias 2011). Tanto nesta mistura como na mistura de referência foram seguidas as especificações constantes do caderno de encargos tipo obra das Estradas de Portugal – CET EP (EP 2014).

4.2 Procedimento Experimental

O procedimento experimental seguiu quatro etapas principais: a caracterização dos materiais utilizados; o estudo de formulação das misturas betuminosas com e sem borracha; a avaliação do desempenho das misturas betuminosas; e, finalmente, a avaliação da evolução do comportamento estrutural das misturas betuminosas perante a presença de fendilhamento induzido.

Os materiais utilizados para a produção das misturas betuminosas foram o betume de penetração nominal 35/50, agregados graníticos britados e filer comercial calcário. Para a mistura MBR-BA foi, ainda, utilizado granulado de borracha proveniente da reciclagem de pneus. Todos os materiais foram caracterizados de acordo com os requisitos exigíveis para a sua aplicação em misturas betuminosas.

Após a caracterização dos materiais, para a percentagem de betume adotada e para mais duas percentagens (0,5% acima e 0,5% abaixo da percentagem adotada), procedeu-se à determinação das características *Marshall* de cada tipo de mistura betuminosa.

Uma vez que a resistência das misturas betuminosas à ação da água assume um papel importante no desempenho e na durabilidade deste tipo de materiais, complementarmente à verificação das características *Marshall*, também para a percentagem de betume adotada e para mais duas percentagens (0,5% acima e 0,5% abaixo da percentagem adotada), fez-se ainda a avaliação da sensibilidade à água a ambas as misturas betuminosas.

Com objetivo de inferir acerca das vantagens da utilização das misturas betuminosas com borracha, adicionada por via seca, em reforço de pavimentos que possuam fendilhamento apreciável nas suas camadas betuminosas, avaliou-se o desempenho estrutural das misturas MBR-BA e AC14 Surf, nomeadamente: a resistência à deformação permanente, através da realização de ensaios com simulador de tráfego (*Wheel Tracking*) a lajes com (ensaio adaptado) e sem fendilhamento induzido; e a resistência à fadiga, através da realização de

ensaios de flexão em quatro pontos a vigas (*Four Point Bending Test*), também, com (ensaio adaptado) e sem fendilhamento induzido.

Com a adaptação efetuada aos ensaios de fadiga e deformação permanente foi possível verificar como as misturas betuminosas reagiram estruturalmente à presença de descontinuidades, que geraram um acréscimo de esforços na vizinhança das mesmas, percebendo-se como a adição de borracha às misturas pode influenciar positivamente a sua resposta estrutural perante condições de carregamento e de suporte mais desfavoráveis.

4.3 Materiais Utilizados

Neste subcapítulo descrevem-se os materiais utilizados neste trabalho, nomeadamente, o betume, o granulado de borracha e os agregados minerais.

4.3.1 Betume

O betume asfáltico utilizado para a formulação das misturas betuminosas com e sem borracha foi o betume convencional de penetração nominal 35/50. A escolha deste betume deveu-se ao facto de, para além de ter sido utilizado em misturas betuminosas do mesmo tipo das avaliadas neste trabalho (Feiteira Dias 2011; Feiteira Dias et al. 2014), ser um dos betumes mais utilizados nas obras de pavimentação em Portugal.

Este betume, de acordo com o Quadro 4.1, cumpre as especificações da norma NP EN 12591 Betumes e Ligantes Betuminosos – Especificações para Betumes de Pavimentação (IPQ 2011a).

Quadro 4.1 – Especificações do betume de penetração nominal 35/50

Características	Unidade	Norma	Min.	Max.
Penetração (25°C)	0,1 mm	EN 1426 (CEN 2007b)	35	50
Índice de penetração	-	NP EN 12591 (IPQ 2011a)	-1,5	+0,7
Temperatura de amolecimento	°C	EN 1427 (CEN 2007a)	50	58
Ponto de fragilidade Fraass	°C	EN 12593 (CEN 2015)	-	-5
Solubilidade	%	NP EN 12592 (IPQ 2016b)	99,0	-
Ponto de inflamação	°C	EN ISO 2592 (CEN 2001b)	240	-
Resistência ao endurecimento a 163°C – NP EN 12607-1 (IPQ 2016a)				
Varição de massa (valor absoluto)	%	NP EN 12607-1 (IPQ 2016a)	-	0,5
Penetração retida	%	EN 1426 (CEN 2007b)	53	-
Temperatura de amolecimento	°C	EN 1427 (CEN 2007a)	-	11

As temperaturas de trabalho, recomendadas pelo fabricante, para este betume são:

- Temperatura da mistura (°C): 160 - 165
- Temperatura do ligante (°C): 160 - 165
- Temperatura de compactação (°C): 150 – 160

Determinaram-se, para o betume fornecido, os valores da penetração a 25°C, norma EN 1426 (CEN 2007b), e da temperatura de amolecimento, norma EN 1427 (CEN 2007a). Como se pode verificar no Quadro 4.2, ambos os valores se enquadraram nos limites estabelecidos pela norma NP EN 12591.

Quadro 4.2 – Penetração a 25°C e temperatura de amolecimento do betume de penetração nominal 35/50

Propriedades	Norma	Betume 35/50
Penetração a 25°C (0,1 mm)	EN 1426 (CEN 2007b)	38
Temperatura de amolecimento (°C)	EN 1427 (CEN 2007a)	57,3

4.3.2 Granulado de Borracha

O granulado de borracha utilizado neste trabalho foi obtido por trituração mecânica à temperatura ambiente. Esta escolha deveu-se ao facto do processo de trituração mecânica,

face ao processo criogénico, produzir uma borracha aparentemente mais adequada para a potencialização da ligação betume-borracha (Fontes 2009; Feiteira Dias 2011; Presti 2013).

Segundo o CET EP (EP 2014), o granulado de borracha, a utilizar no fabrico de misturas betuminosas, deverá ser obtido a partir da reciclagem de borracha de pneus, 100% vulcanizada. O granulado deverá possuir um elevado conteúdo de borracha natural, um teor em fibra máximo de 0,1%, um teor em aço máximo de 0,3% e um teor em água máximo de 2%.

Apresentam-se, no Quadro 4.3, as características físicas do granulado de borracha utilizado no fabrico das misturas betuminosas, com alta percentagem de borracha, deste trabalho.

Quadro 4.3 – Características físicas do granulado de borracha

Granulado de Borracha com dimensões até 0,8 mm		
Parâmetros	Método de Ensaio	Resultado
Cor	Visual	Preto
Densidade Aparente (Granel)	ISO 60 (ISO 1977)	0,35 ± 0,02
Densidade Absoluta	Picnómetro de Hélio	1,15 ± 0,06
Humidade (% em massa)	Interno	< 1,0
Partículas de Aço (% em massa)	CEN TS 14243 (CEN 2010a)	< 0,1
Partículas de Fibra Têxtil (% em massa)	CEN TS 14243	< 0,1
Inertes (% em massa)	CEN TS 14243	< 1,0
Área Superficial (cm ² /g)	ASTM B922 (ASTM 2002)	620 ± 40
Dimensões (mm)	CEN TS 14243	0,0 a 0,8

Na Figura 4.1 apresenta-se a curva granulométrica do granulado de borracha, a qual cumpre limites granulométricos preconizados pelo CET EP (EP 2014).

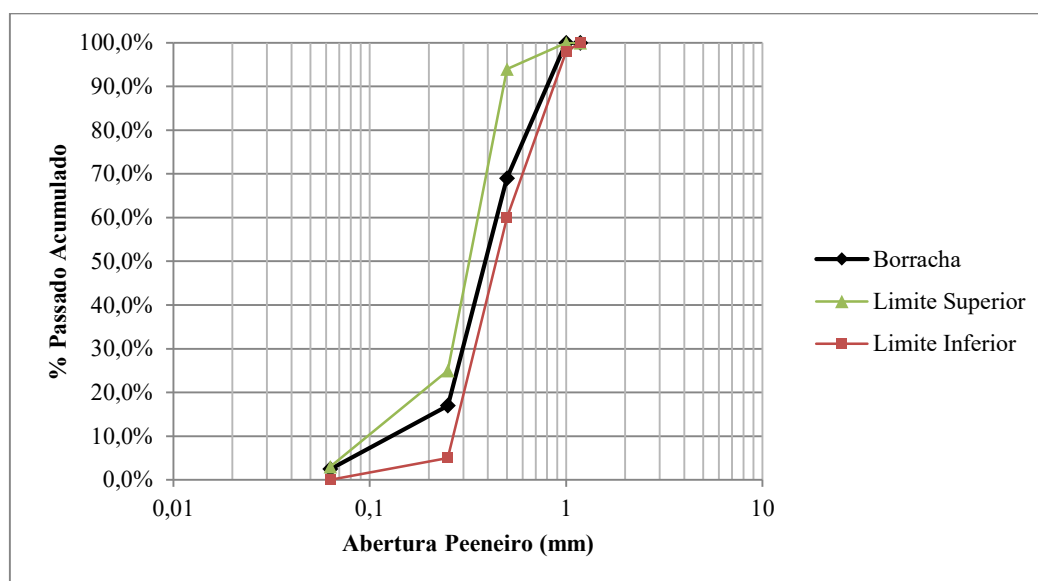


Figura 4.1 – Curva granulométrica do granulado de borracha

4.3.3 Interação Física entre o Betume e a Borracha

Na produção da mistura MBR-BA foi considerado um tempo de interação física entre o betume e a borracha de 120 minutos, período compatível com o tempo médio entre o fabrico e o espalhamento de misturas betuminosas para grande parte das obras rodoviárias. A adoção deste tempo de interação física entre o betume e a borracha teve em consideração estudos efetuados a misturas betuminosas do mesmo tipo, ou seja, produzidas por via seca e com partículas de borracha de dimensões ultrafinas (Feiteira Dias 2011; López-Moro et al. 2013; Feiteira Dias et al. 2014).

Para aproveitar todas as características que o betume modificado com borracha apresenta nas misturas betuminosas em comparação com betumes convencionais, deverá ser considerado, no processo de interação betume-borracha, o valor limite de 170°C para a temperatura (Feiteira Dias & Picado-Santos 2008; Feiteira Dias 2011).

4.3.4 Agregados

Neste trabalho foram utilizados agregados graníticos britados, provenientes da exploração de formações homogêneas de uma pedra localizada em Santa Maria da Feira, Portugal. Foi utilizado também filer comercial calcário, com partículas de tamanho inferior a 0,5 mm, procedente de Leiria, Portugal.

Os agregados minerais britados, utilizados na produção das misturas betuminosas, possuem a seguinte designação granulométrica:

- Brita 8/20 – tamanho nominal entre 8,0 e 20,0 mm;
- Brita 4/12 – tamanho nominal entre 4,0 e 12,0 mm;
- Brita 4/10 – tamanho nominal entre 4,0 e 10,0 mm;
- Brita 0/4 (pó-de-pedra) – tamanho nominal inferior a 4,0 mm.

De acordo com os requisitos do CET EP (EP 2014), as propriedades dos agregados utilizados nas misturas MBR-BA e AC14 Surf apresentam-se no Quadro 4.4.

Quadro 4.4 – Propriedades dos agregados

Propriedades		Normas	Brita 8/20	Brita 4/12	Brita 4/10	Pó 0/4	Caderno Encargos(2014)
Eq. de Areia (%)		NP EN 933-8 (IPQ 2012a)	---	---	---	91	---
Azul de Metileno		NP EN 933-9 (IPQ 2011b)	---	---	---	MB _F 10	MB _F 10 ¹
Índice de Achatamento		NP EN 933-3 (IPQ 2014b)	FI ₁₅	FI ₁₅	FI ₁₅	---	FI ₁₅ ; FI ₂₀ ²
Massa volúmica das partículas (Mg/m ³)	MI	NP EN 1097-6 (IPQ 2016c)	2,63	2,62	2,63	2,61	---
	PSt		2,61	2,59	2,59	2,60	---
	PS		2,61	2,61	2,60	2,60	---
Absorção de água (%)	0,40		0,70	0,50	0,20	≤1	
Resistência ao desgaste por atrito do agregado grosso, coeficiente micro-Deval		NP EN 1097-1 (IPQ 2012b)	M _{DE} 15	M _{DE} 15	M _{DE} 15	---	M _{DE} 15
Resistência à fragmentação do agregado grosso, coeficiente Los Angeles		NP EN 1097-2 (IPQ 2011c)	LA ₂₀	LA ₂₀	LA ₂₀	---	LA ₂₀ ³

Legenda: MI – material impermeável; PSt – partículas saturadas com superfície seca; PS – partículas secas

¹ Quando a percentagem de passados no peneiro de 0,063 mm no agregado fino, estiver compreendido entre 3% e 10%, em massa, deve ser avaliada a nocividade dos finos da fração 0/0,125 mm e o valor do ensaio de azul de metileno deve estar enquadrado na categoria MB_F10.

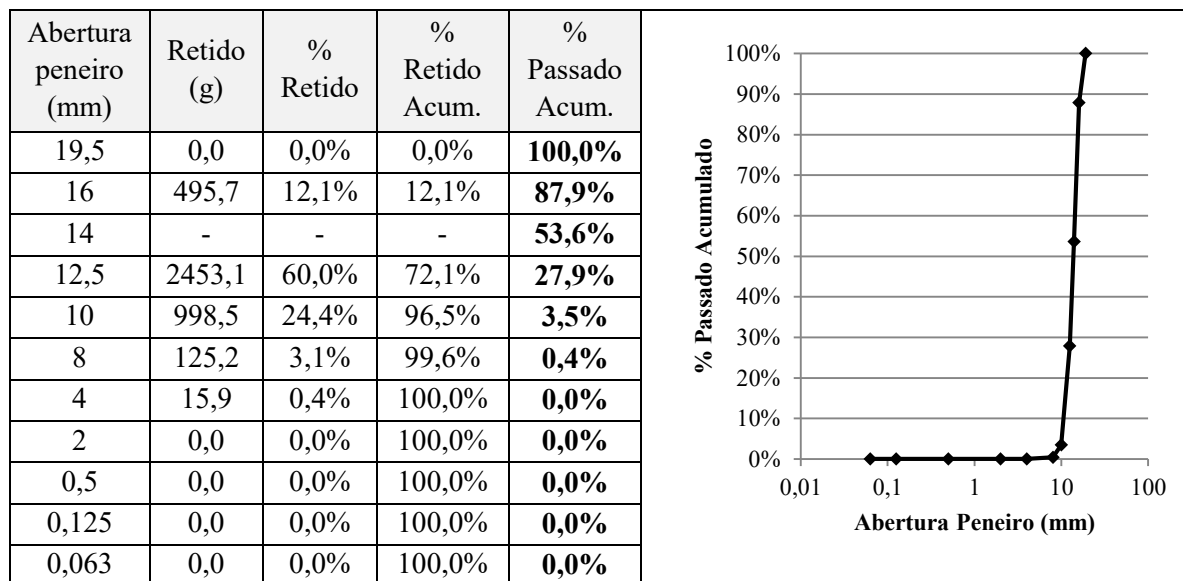
² Deverá ser FI₁₅ para a mistura betuminosa MBR-BA e FI₂₀ para a mistura betuminosa AC14 Surf.

³ Para rochas granitoides (de acordo com nomenclatura indicada na descrição petrográfica simplificada): LA₃₀

A análise granulométrica seguiu procedimento recomendado pela norma NP EN 933-1 (IPQ 2014a) para os agregados britados, e pela norma EN 933-10 (CEN 2010b) para o filer comercial.

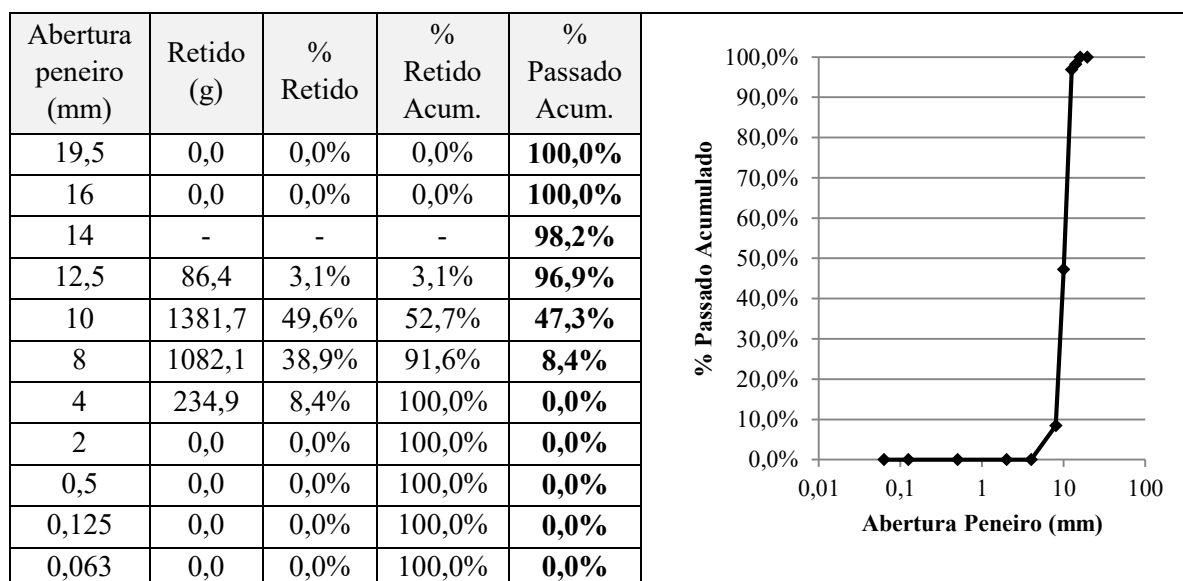
No Quadro 4.5 apresenta-se a curva granulométrica da brita 8/20.

Quadro 4.5 – Curva granulométrica da brita 8/20



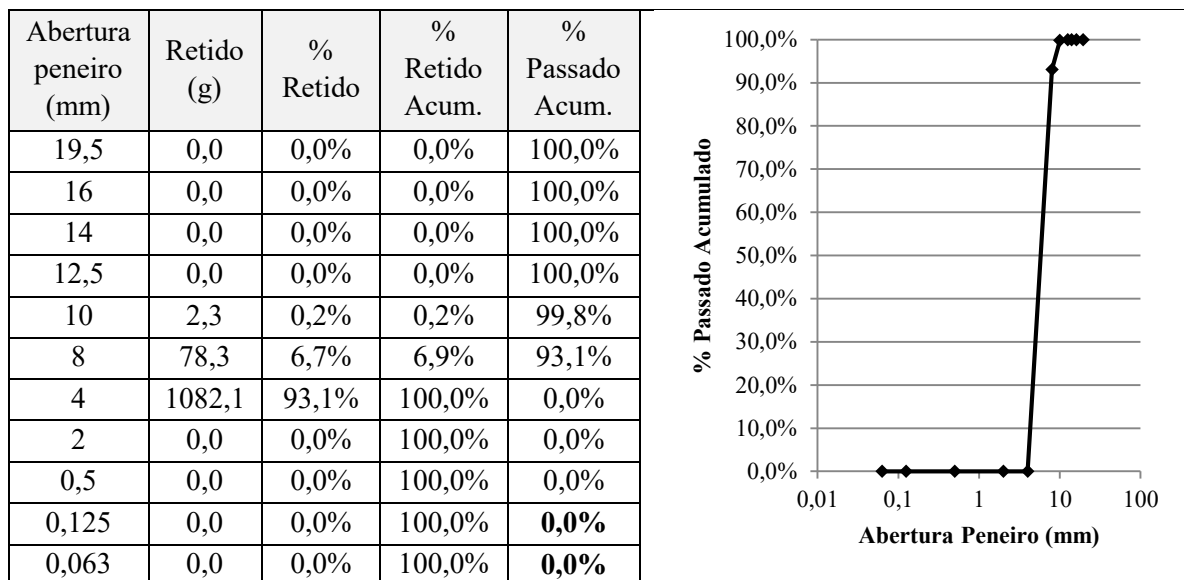
No Quadro 4.6 apresenta-se a curva granulométrica da brita 4/12.

Quadro 4.6 – Curva granulométrica da brita 4/12



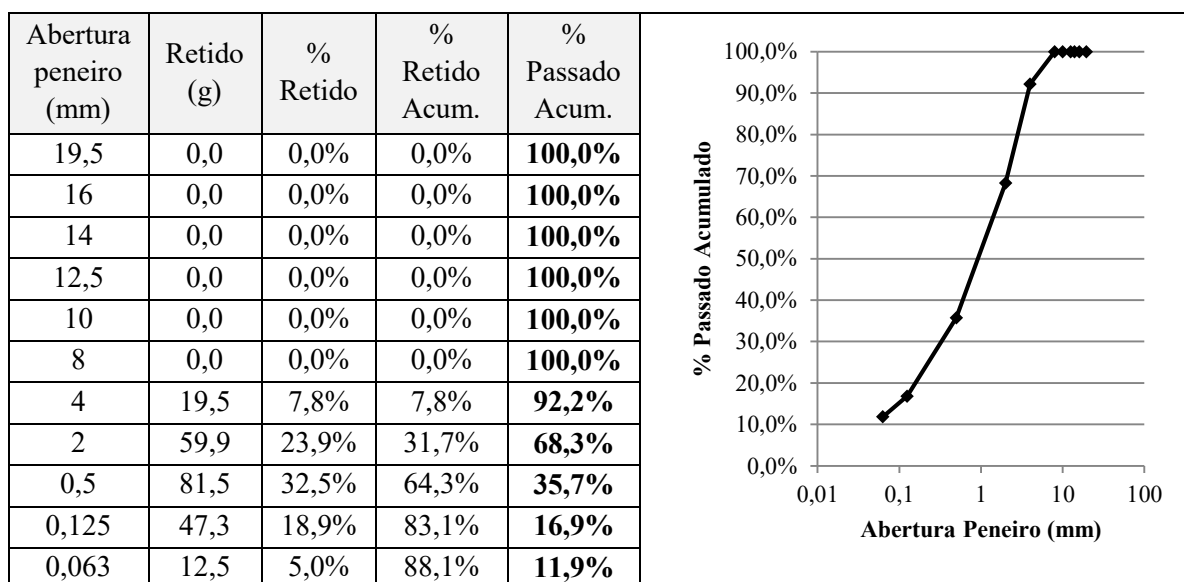
No Quadro 4.7 apresenta-se a curva granulométrica da brita 4/10.

Quadro 4.7 – Curva granulométrica da Brita 4/10



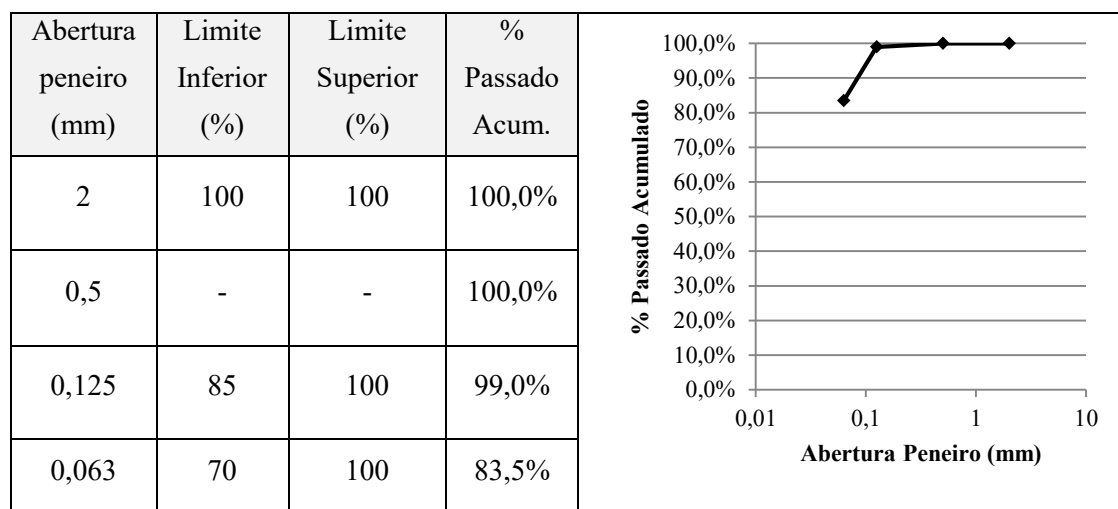
No Quadro 4.8 apresenta-se a curva granulométrica da Brita 0/4 (pó de pedra).

Quadro 4.8 – Curva granulométrica da Brita 0/4 (pó de pedra)



No Quadro 4.9 apresenta-se a curva granulométrica do filer comercial.

Quadro 4.9 – Curva granulométrica do filer



Assumindo as percentagens ponderais em massa de 15% de brita 8/20, 35% de brita 4/12, 25% de brita 4/10, 23% de pó de pedra e 2% de filer comercial, apresenta-se, no Quadro 4.10 e na Figura 4.2, a curva granulométrica da mistura MBR-BA.

Quadro 4.10 – Análise granulométrica da mistura MBR-BA

Abertura peneiro (mm)	Brita 8/20	Brita 4/12	Brita 4/10	Brita 0/4	Filer	MBR-BBA	Limites CET EP	
							Inferior	Superior
	15,0%	35,0%	25,0%	23,0%	2,0%	100,0%		
20	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%
14	53,6%	98,2%	100,0%	100,0%	100,0%	92,4%	90,0%	100,0%
10	3,5%	47,3%	99,8%	100,0%	100,0%	67,0%	58,0%	88,0%
8	0,4%	8,4%	93,1%	100,0%	100,0%	51,3%	38,0%	60,0%
4	0,0%	0,0%	0,0%	92,2%	100,0%	23,2%	20,0%	32,0%
2	0,0%	0,0%	0,0%	68,3%	100,0%	17,7%	12,0%	20,0%
0,5	0,0%	0,0%	0,0%	35,7%	100,0%	10,2%	6,0%	13,0%
0,125	0,0%	0,0%	0,0%	16,9%	90,0%	5,7%	4,0%	8,0%
0,063	0,0%	0,0%	0,0%	11,9%	83,5%	4,4%	3,0%	6,0%

Do Quadro 4.10 e da Figura 4.2, pode verificar-se que a mistura MBR-BA cumpre os limites granulométricos preconizados pelo CET EP (EP 2014).

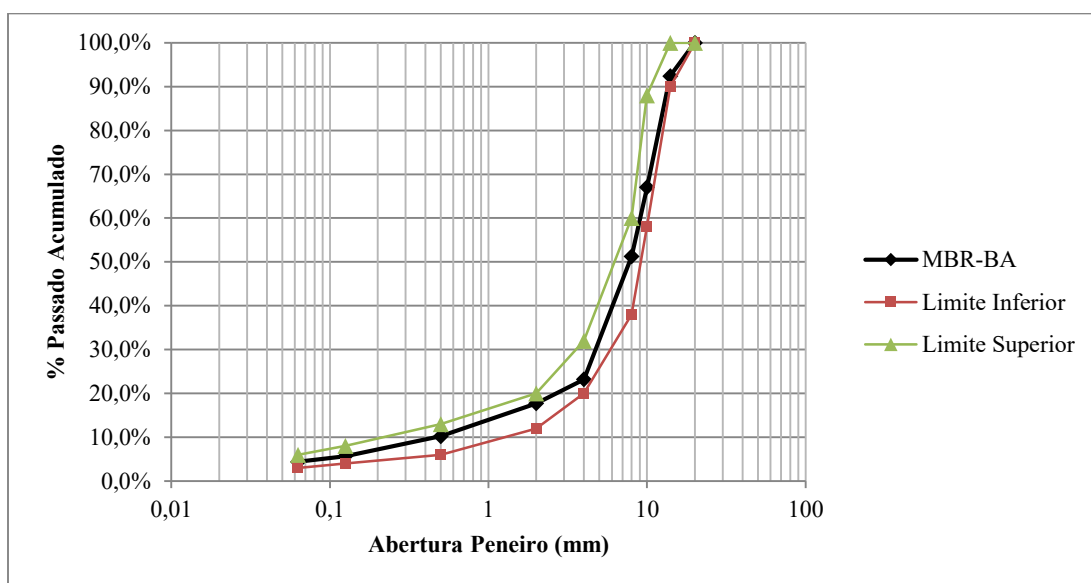


Figura 4.2 – Curva granulométrica da mistura MBR-BA

Para as percentagens ponderais em massa de 20% de brita 8/20, 20% de brita 4/12, 15% de brita 4/10, 43% de pó de pedra e 2% de filer comercial, apresenta-se, no Quadro 4.11 e na Figura 4.3, a curva granulométrica da mistura AC14 Surf.

Quadro 4.11 – Análise granulométrica da mistura AC14 Surf

Abertura peneiro (mm)	Brita 8/20	Brita 4/12	Brita 4/10	Brita 0/4	Filer	AC14 Surf	Limites CET EP	
							Inferior	Superior
	20,0%	20,0%	15,0%	43,0%	2,0%	100,0%		
20	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%
14	53,6%	98,2%	100,0%	100,0%	100,0%	90,4%	90,0%	100,0%
10	3,5%	47,3%	99,8%	100,0%	100,0%	70,1%	67,0%	77,0%
8	0,4%	8,4%	93,1%	100,0%	100,0%	60,7%	-	-
4	0,0%	0,0%	0,0%	92,2%	100,0%	41,7%	40,0%	52,0%
2	0,0%	0,0%	0,0%	68,3%	100,0%	31,4%	25,0%	40,0%
0,5	0,0%	0,0%	0,0%	35,7%	100,0%	17,4%	11,0%	19,0%
0,125	0,0%	0,0%	0,0%	16,9%	90,0%	9,0%	6,0%	10,0%
0,063	0,0%	0,0%	0,0%	11,9%	83,5%	6,8%	5,0%	8,0%

Também a mistura AC14 Surf, de acordo com o Quadro 4.11 e com a Figura 4.3, cumpre os limites granulométricos preconizados pelo CET EP (EP 2014).

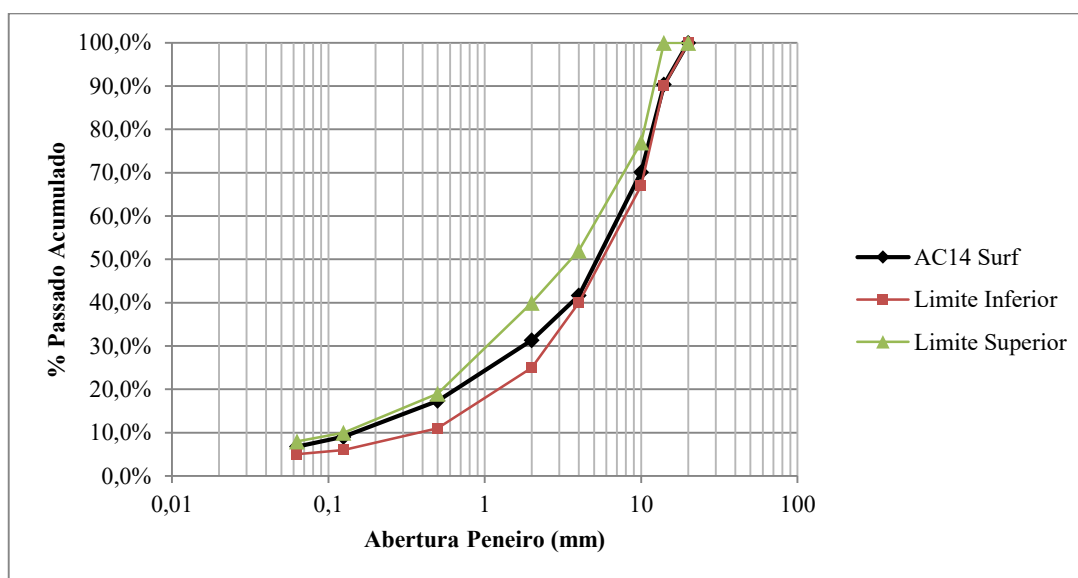


Figura 4.3 – Curva granulométrica da mistura AC14 Surf

4.4 Formulação das Misturas Betuminosas

Neste subcapítulo, para a percentagem de betume adotada e para mais duas percentagens (0,5% acima e 0,5% abaixo da percentagem adotada) determinam-se as principais propriedades das misturas MBR-BA e AC14 Surf, nomeadamente, através da realização de provetes *Marshall*, a estabilidade, a baridade, a porosidade, a deformação e o VMA (volume de vazios no esqueleto do agregado). Para as mesmas percentagens de betume é também efetuada a avaliação da sensibilidade à água a ambas as misturas betuminosas.

As percentagens de betume adotadas, denominadas seguidamente por percentagens ótimas, foram de 5,0% para a mistura AC14 Surf e de 8,0% para a mistura MBR-BA. A adoção destas percentagens teve em consideração as percentagens adotadas em formulações do mesmo tipo de misturas efetuadas em trabalhos anteriores (Feiteira Dias 2011; Feiteira Dias et al. 2014).

4.4.1 Características *Marshall*

De forma a verificar que ambas as misturas cumpriam os limites recomendados pelo CET EP (EP 2014), efetuou-se uma avaliação das características *Marshall* (Figura 4.4) de ambas as misturas betuminosas.

Figura 4.4 – Ensaio *Marshall*

Como referido em 4.3.1, o betume utilizado foi o betume convencional de penetração nominal 35/50. Na formulação de todas as misturas betuminosas deste trabalho foram cumpridos os intervalos de temperatura recomendados pelo fornecedor, nomeadamente a temperatura de 160°C a 165°C para a mistura dos materiais e para o aquecimento do ligante, e a temperatura de 150°C a 160°C para a compactação. Os agregados foram previamente aquecidos à temperatura de 185°C.

No caso particular da mistura betuminosa MBR-BA, por esta conter granulado de borracha, o procedimento descrito anteriormente sofreu algumas alterações.

Antes da adição do betume aos agregados, foi misturada a borracha com os mesmos durante aproximadamente 15 segundos. Findo este período, foi adicionado o betume que envolveu a borracha e os agregados. Após a mistura dos materiais não se procedeu imediatamente à

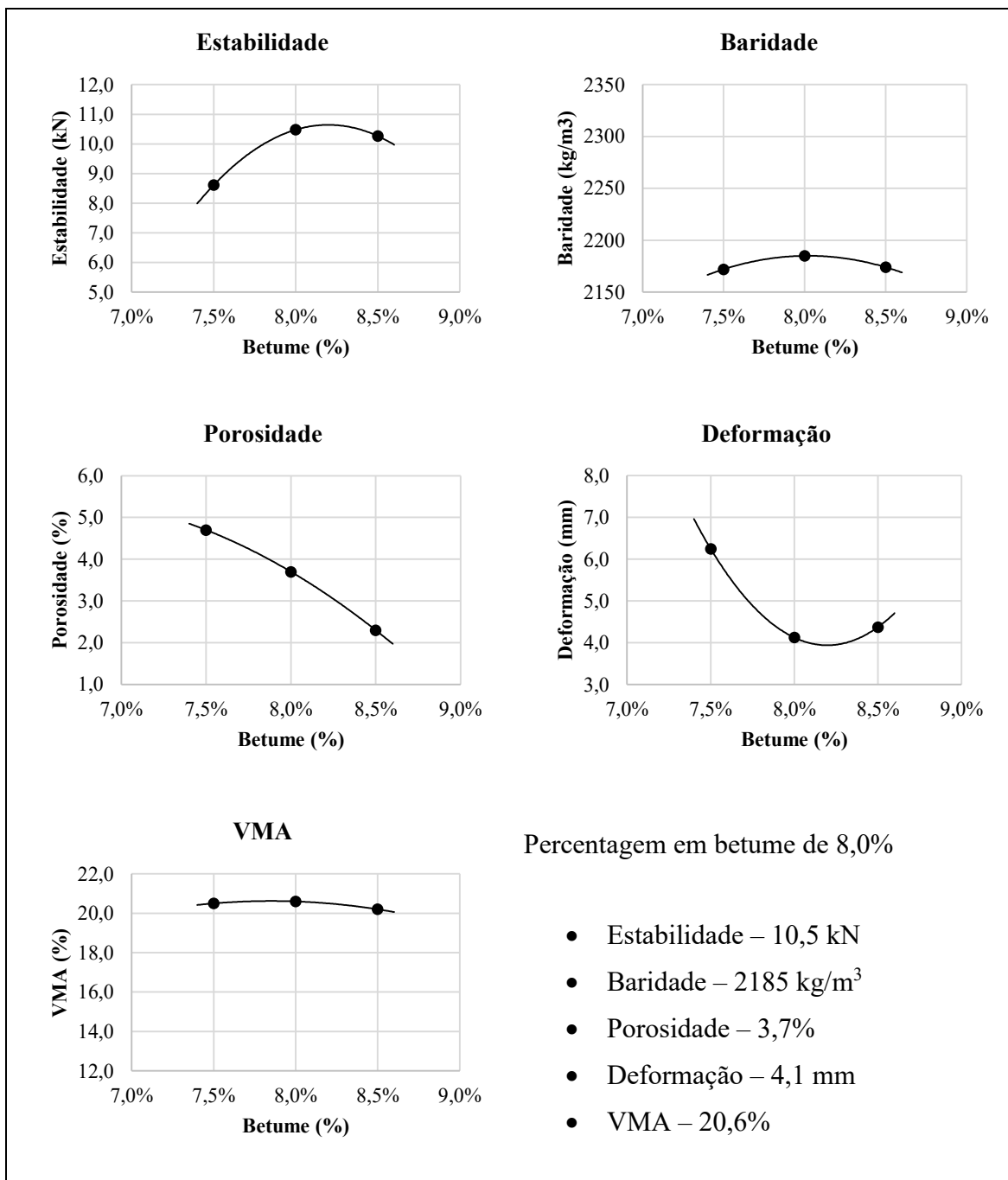
compactação, pois foi necessário garantir o tempo de interação física entre o betume e a borracha. Para tal, a mistura permaneceu em estufa, à temperatura de 160°C, durante 120 minutos, procedendo-se posteriormente à sua compactação.

De acordo com o CET EP (EP 2014), o material betuminoso foi colocado dentro de moldes metálicos e compactado com um martelo normalizado que aplicou sobre cada um dos topos do provete 75 pancadas. Resultaram provetes cilíndricos com 101,6 mm de diâmetro e $63,4 \pm 1,5$ mm de altura (Gardete et al. 2012; Gardete et al. 2013).

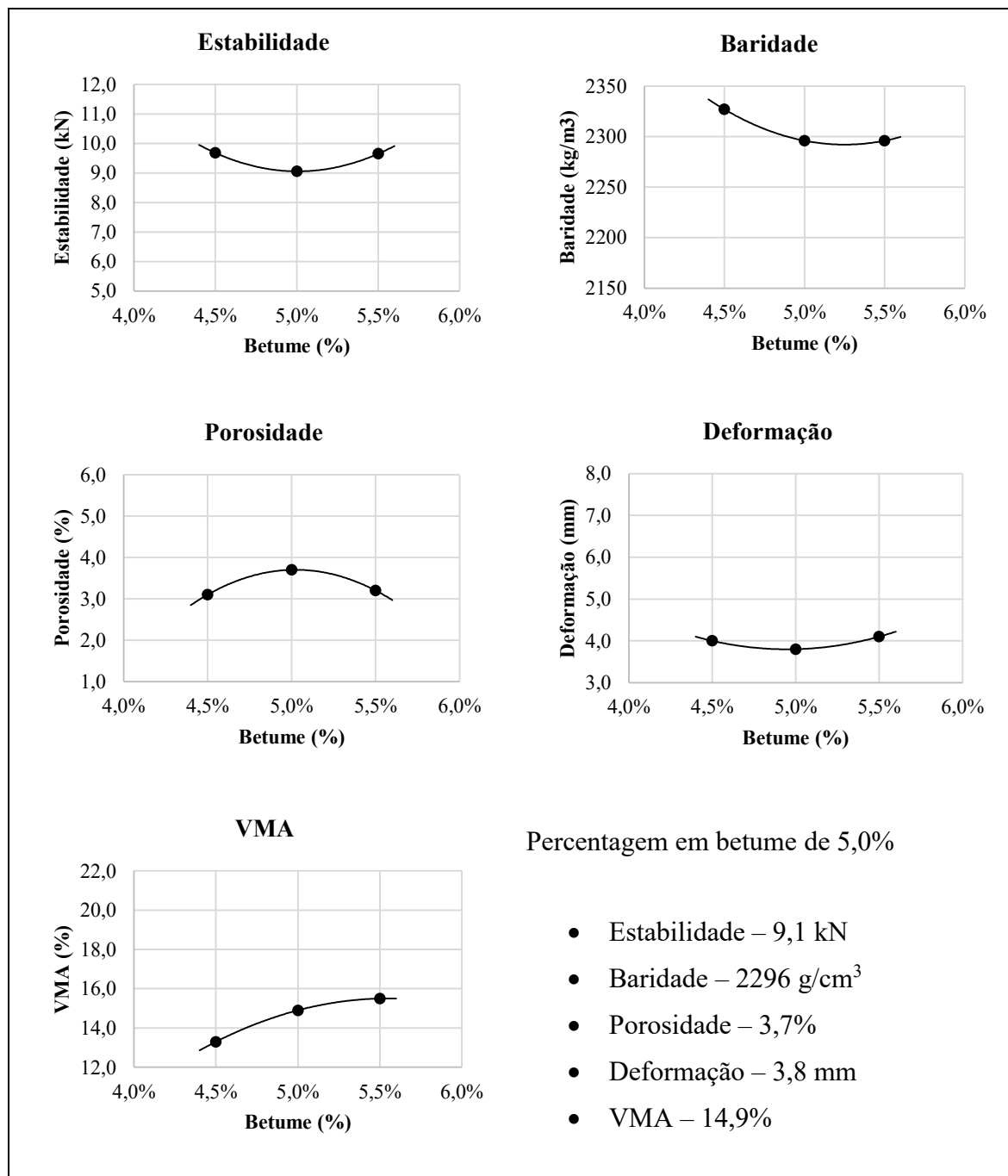
Apresentam-se, no Quadro 4.12, as características *Marshall* da mistura MBR-BA. Como referido anteriormente, para os ensaios experimentais constantes das fases seguintes deste trabalho, será considerada para esta mistura uma percentagem de 8,0% de betume.

No Quadro 4.13, apresentam-se as características *Marshall* da mistura AC14 Surf. Também, como referido anteriormente, para os ensaios experimentais constantes das fases seguintes deste trabalho, será considerada para esta mistura uma percentagem de 5% de betume.

Quadro 4.12 – Características Marshall da mistura MBR-BA



Quadro 4.13 – Características *Marshall* da mistura AC14 Surf



4.4.2 Sensibilidade à água – ITSR

A resistência das misturas betuminosas à ação da água assume um papel importante no desempenho e na durabilidade deste tipo de materiais. Por tal facto, os cadernos de encargos das obras de pavimentação incluem, normalmente, limites relativos à sensibilidade à água

das misturas betuminosas, normalmente avaliada através da perda de resistência mecânica das misturas após condicionamento em água (Batista & Antunes 2009).

A avaliação da sensibilidade à água de misturas betuminosas é realizada recorrendo a ensaios de resistência mecânica sobre dois grupos de provetes betuminosos de características idênticas, acondicionados previamente, no que respeita à ação da água, em condições diferenciadas de severidade. O quociente entre a resistência média dos provetes acondicionados em condições mais severas e a resistência média dos provetes acondicionados em condições menos severas, determina um valor de resistência conservada. Este valor é tomado como indicador de sensibilidade à água das misturas betuminosas (Airey & Choi 2002; Micaelo et al. 2015).

De acordo com o preconizado pelo CET EP (EP 2014), a avaliação da sensibilidade à água das misturas betuminosas deverá seguir o estipulado pela norma EN 12697-12 (CEN 2008).

A primeira edição de norma EN 12697-12, de 2003, apresentava apenas um método para avaliação da sensibilidade à água das misturas betuminosas. Este método, adotado em Portugal, era baseado na resistência à tração indireta de provetes betuminosos cilíndricos. Com a nova edição da norma, de 2008, para além do método anterior (método A), ficaram disponíveis mais dois métodos de ensaio, o método B e o método C. O método B é baseado na resistência à compressão simples de provetes cilíndricos. O método C não é aplicável ao caso geral das misturas betuminosas em Portugal (Batista & Antunes 2009).

A nível europeu verifica-se que, dos três métodos estabelecidos na EN 12697-12, é o método A aquele que, de forma geral, tem sido mais utilizado. Aqui ao lado, na vizinha Espanha, o Caderno de Encargos Tipo preconiza valores limite para a resistência conservada das misturas betuminosas de acordo com este método. Desta forma, a avaliação da sensibilidade à água neste trabalho seguiu o preconizado pelo método A da EN 12697-12.

De acordo com o método A, tanto para a mistura AC14 Surf como para a mistura MBR-BA, foram preparados um total de 6 provetes cilíndricos por cada percentagem de betume. Estes provetes foram separados em dois grupos, de três provetes cada, com características idênticas (altura e baridade média), sendo garantidas as diferenças máximas de 5 mm para os comprimentos e 15 kg/m³ para as baridades médias. Os provetes foram todos moldados na mesma semana e tiveram um período de cura, antes do período de acondicionamento, compreendido entre 16h e 24h.

Um dos grupos de 3 provetes foi acondicionado ao ar a (20 ± 5) °C. O outro grupo de 3 provetes foi em primeiro lugar submetido a vácuo em água a (20 ± 5) °C e mantido durante (30 ± 5) minutos a uma pressão de $(6,7 \pm 0,3)$ kPa, de forma a garantir que a água penetrava adequadamente nos poros dos provetes. Seguidamente, os provetes deste grupo foram acondicionados em banho de água a (40 ± 1) °C durante 68 a 72 horas, e finalmente foram colocados à temperatura de ensaio (20 ± 5) °C o tempo necessário para garantir uma temperatura uniforme.

Após a conclusão do período de acondicionamento, os provetes foram sujeitos ao ensaio para a determinação da resistência à tração indireta. Uma vez obtidos os valores médios das resistências à tração indireta dos provetes imersos (ITS_w) e dos provetes “a seco” (ITS_d) foi calculada a resistência conservada em tração indireta (ITSR) através da expressão (4.1).

$$ITSR = 100 \times \frac{ITS_w}{ITS_d} (\%) \quad (4.1)$$

Apresentam-se, no Quadro 4.14, para a mistura MBR-BA, as baridades médias de cada grupo de provetes, utilizados no ensaio ITSR, para as percentagens de betume de 7,5%, 8,0% e 8,5% respetivamente.

Quadro 4.14 – Baridade dos provetes da mistura MBR-BA (ensaio ITSR)

Provete	Betume	Massa seca	Massa imersa	Massa superfície seca	Temp. água	Baridade (kg/m ³)		
	(%)	m ₁ (g)	m ₂ (g)	m ₃ (g)	°C	Provete	Grupo	Diferença
01	7,5%	1093,30	600,55	1094,55	20,0	2209,40	2202,27	9,51
02		1100,35	598,45	1101,70	20,0	2182,77		
03		1099,45	604,45	1100,05	20,0	2214,65		
04		1093,75	599,65	1094,25	20,0	2207,62	2192,76	
05		1090,25	592,35	1090,85	20,0	2183,34		
06		1087,85	592,70	1089,20	20,0	2187,31		
07	8,0%	1106,25	605,15	1115,40	20,0	2164,37	2172,63	6,48
08		1105,45	612,00	1109,45	20,0	2218,46		
10		1097,90	597,55	1110,90	20,0	2135,06		
09		1096,85	601,00	1101,70	20,0	2186,91	2179,10	
11		1100,15	602,75	1105,95	20,0	2182,59		
12		1118,00	609,65	1124,50	20,0	2167,81		
14	8,5%	1104,75	603,45	1107,05	20,0	2189,98	2180,15	0,38
15		1082,70	587,95	1088,90	20,0	2157,62		
17		1093,15	599,70	1097,10	20,0	2193,99		
13		963,00	520,25	968,45	20,0	2144,94	2180,53	
16		1095,10	597,10	1096,80	20,0	2187,79		
18		1104,85	607,15	1106,75	20,0	2207,71		

Da análise das baridades da mistura MBR-BA, verifica-se que em nenhuma das percentagens de betume é ultrapassada a diferença de 15 kg/m³ na comparação das baridades médias de cada grupo.

De forma inferir acerca da resistência da mistura MBR-BA à ação da água apresentam-se, no Quadro 4.15, os resultados ITSR para as percentagens de betume de 7,5%, 8,0% e 8,5%.

Quadro 4.15 – Resultados ITSR da mistura MBR-BA

Provete	% Betume	Altura média, h (mm)			Força de Rotura (kN)		ITSR (%)
		Provete	Grupo	Diferença	Provete	Grupo	
01	7,5%	62,47	63,28	0,05	15,329	14,948	95%
02		64,54			13,887		
03		62,82			15,628		
04		62,65	63,23		15,427	14,209	
05		63,02			12,903		
06		64,04			14,296		
07	8,0%	66,07	65,81	0,35	13,544	14,396	96%
08		64,47			15,305		
10		66,88			14,340		
09		65,16	66,16		14,196	13,854	
11		65,33			14,421		
12		68,01			12,944		
14	8,5%	57,38	61,53	2,70	11,840	14,507	97%
15		63,02			15,010		
17		64,19			16,672		
13		63,60	64,23		15,301	14,045	
16		65,23			12,829		
18		63,88			14,006		

Relativamente à geometria dos provetes da mistura MBR-BA, verifica-se que em nenhuma das percentagens de betume é ultrapassada a diferença de 5 mm na comparação das alturas médias do cada grupo de provetes.

No que se refere à sensibilidade à água, para ambas as percentagens de betume, a mistura MBR-BA apresenta valores de ITSR muito superiores a 65% (valor mínimo estipulado pelo CET EP para uma mistura deste tipo). Para a percentagem de betume (8,0%), o valor de ITSR é 96%. Este valor elevado (próximo de 100%) indica que este tipo de mistura betuminosa com adição de borracha por via seca tem um bom comportamento aquando da submissão à ação da água.

Na Figura 4.5 mostram-se duas fotografias aos provetes resultantes do ensaio ITSR à mistura MBR-BA. À esquerda (a) apresenta-se uma vista geral dos provetes ensaiados e à direita (b) apresenta-se uma vista da área de rotura de um desses provetes. Da visualização dos provetes

desta mistura betuminosa verificou-se que o tipo de rotura foi predominantemente por deformação.

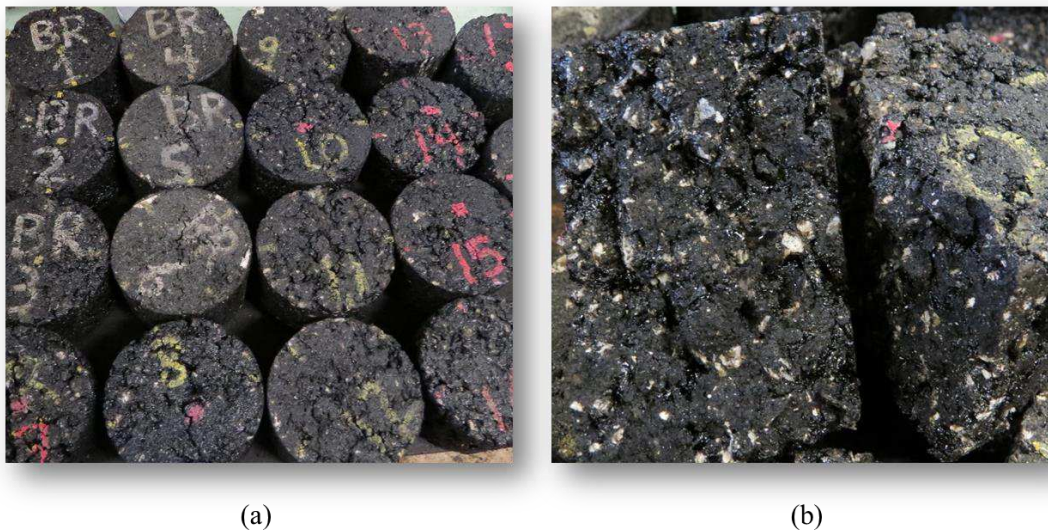


Figura 4.5 - Provetes resultantes do ensaio ITRR à mistura MBR-BA. Vista geral dos provetes ensaiados (a), vista da área de rotura de um provete (b)

Apresentam-se, no Quadro 4.16, para a mistura AC14 Surf, as baridades médias de cada grupo de provetes, utilizados no ensaio ITRR, para as percentagens de betume de 4,5%, 5,0% e 5,5%.

Quadro 4.16 – Baridade dos provetes da mistura AC14 Surf (ensaio ITSR)

Provete	Betume	Massa seca	Massa imersa	Massa superfície seca	Temp. água	Baridade (kg/m ³)		
	(%)	m ₁ (g)	m ₂ (g)	m ₃ (g)	°C	Provete	Grupo	Diferença
01	4,5%	1099,25	624,20	1126,65	20,0	2184,06	2201,76	9,59
02		1073,00	613,90	1102,05	20,0	2194,36		
03		1100,60	628,70	1122,10	20,0	2226,85		
04		1070,30	613,20	1098,05	20,0	2203,73	2211,35	
05		1096,50	623,20	1113,05	20,0	2234,63		
06		918,70	524,45	942,15	20,0	2195,69		
07	5,0%	1135,95	645,80	1156,05	20,0	2222,48	2241,72	1,88
08		1131,25	640,40	1144,75	20,0	2239,17		
09		1134,25	642,15	1142,40	20,0	2263,51		
10		1130,75	640,65	1149,10	20,0	2220,14	2243,60	
11		1139,90	647,25	1154,55	20,0	2243,17		
12		1133,40	646,80	1145,80	20,0	2267,48		
13	5,5%	1137,95	642,90	1152,10	20,0	2230,98	2224,99	5,87
14		1134,35	642,65	1152,65	20,0	2220,43		
15		1131,15	643,20	1151,05	20,0	2223,54		
16		1130,30	640,85	1145,30	20,0	2236,85	2230,86	
17		1134,25	644,75	1151,95	20,0	2232,50		
18		1132,10	642,80	1151,15	20,0	2223,22		

Da análise das baridades da mistura AC14 Surf, verifica-se, também, que em nenhuma das percentagens de betume é ultrapassada a diferença de 15 kg/m³ na comparação das baridades médias de cada grupo.

De forma inferir acerca da resistência da mistura AC14 Surf à ação da água apresentam-se, no Quadro 4.17, os resultados ITSR para as percentagens de betume de 4,5%, 5,0% e 5,5%.

Quadro 4.17 – Resultados ITSR da mistura AC14 Surf

Provete	% Betume	Altura média, h (mm)			Força de Ruptura (kN)		ITSR (%)
		Provete	Grupo	Diferença	Provete	Grupo	
01	4,5%	65,23	64,87	3,09	15,752	14,578	96%
02		65,24			11,437		
03		64,16			16,545		
04		63,40	61,78		11,223	13,949	
05		63,49			16,726		
06		58,44			13,899		
07	5,0%	67,00	65,43	0,08	15,553	17,106	86%
08		64,92			18,412		
09		64,38			17,354		
10		66,36	65,51		12,952	14,719	
11		65,28			14,189		
12		64,89			17,015		
13	5,5%	66,11	66,88	0,83	17,778	15,696	94%
14		67,78			15,227		
15		66,75			14,084		
16		66,12	66,05		14,549	14,754	
17		66,47			14,283		
18		65,57			15,431		

Relativamente à geometria dos provetes da mistura betuminosa AC14 Surf, também se verifica que em nenhuma das percentagens de betume é ultrapassada a diferença de 5 mm na comparação das alturas médias do cada grupo de provetes.

Apresenta-se, na Figura 4.6, duas fotografias aos provetes resultantes do ensaio ITSR à mistura AC14 Surf. À esquerda (a) apresenta-se uma vista geral dos provetes ensaiados e à direita (b) apresenta-se uma vista da área de ruptura de um desses provetes. Da visualização dos provetes desta mistura betuminosa verificou-se que o tipo de ruptura foi predominantemente por tração indireta.

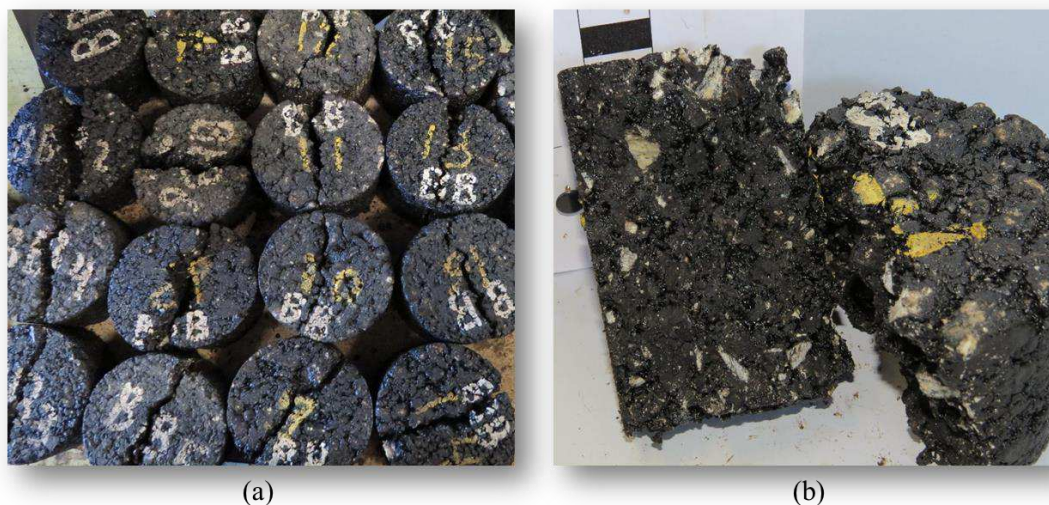


Figura 4.6 - Provetes resultantes do ensaio ITRR à mistura AC14 Surf. Vista geral dos provetes ensaiados (a), vista da área de rotura de um provete (b)

No que se refere à sensibilidade à água, para a maioria das percentagens de betume estudadas, a mistura AC14 Surf apresenta valores de ITRR inferiores aos da mistura MBR-BA.

Para a mistura AC14 Surf, na percentagem de betume de 5,0%, o valor de ITRR é 86%. No caso da mistura MBR-BA, também na percentagem de betume 8,0% o valor de ITRR foi de 96%. Estes valores mostram que, no que refere à sensibilidade à água, a mistura betuminosa com borracha (MBR-BA) apresenta melhor comportamento do que a mistura betuminosa sem borracha (AC14 Surf).

4.5 Desempenho Estrutural das Misturas Betuminosas

Neste subcapítulo apresenta-se a avaliação do desempenho estrutural das misturas betuminosas estudadas, nomeadamente a resistência à deformação permanente e à fadiga.

4.5.1 Comportamento à Deformação Permanente

As causas de formação de rodeiras devido à deformação permanente em misturas betuminosas têm vindo a agravar-se, esperando-se que insucessos relacionados com esta patologia venham a aumentar. Desta forma, para caracterizar a resistência à deformação permanente de misturas betuminosas têm sido desenvolvidos diversos ensaios laboratoriais.

Estes ensaios estão distribuídos por três grupos (Freire et al. 2006; Gardete, Picado-Santos & Pais 2008; Feiteira Dias 2011):

- ensaios empíricos (*Marshall* e Hveem);
- ensaios fundamentais (compressão uniaxial estático ou cíclico, triaxial, de corte, de compressão diametral e em cilindro oco);
- ensaios de simulação de tráfego (em laboratório e à escala real).

Estes ensaios apresentam características muito diversas e, em consequência, modelos de previsão com fiabilidades também diferentes (Capitão et al. 2012). Capitão (2003) faz uma boa descrição dos exemplos de cada um dos tipos de ensaios que podem ser usados na avaliação da resistência à deformação permanente em misturas betuminosas (Figura 4.7).

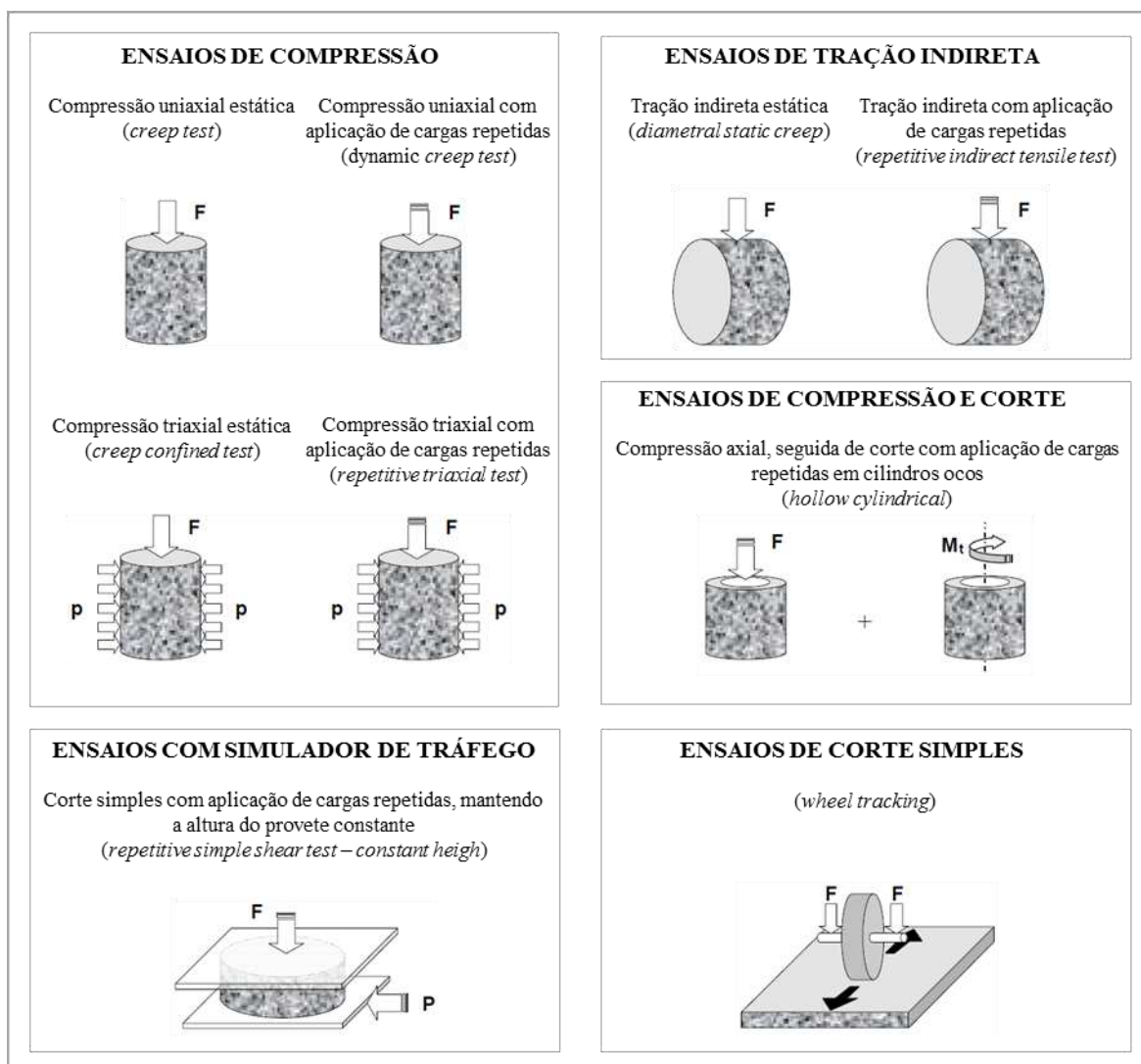


Figura 4.7 - Ensaios utilizados para avaliação da resistência à deformação permanente das misturas betuminosas, Capitão (2003)

As novas normas europeias, no que respeita à avaliação do comportamento à deformação permanente, consideram os ensaios de *Wheel Tracking* (CEN 2003a) e os ensaios de Compressão Uniaxial Cíclico e Triaxial Cíclico (CEN 2005). Nos EUA tem sido utilizado o ensaio de Corte a Altura Constante (AASHTO 2001), no entanto, embora exista capacidade de o realizar, este tem sido pouco utilizado nas instituições portuguesas (Gardete, Picado-Santos, Pais, et al. 2008; Capitão & Picado-Santos 2006b).

Atualmente existe uma boa diversidade de equipamentos que podem ser usados para avaliar a resistência à deformação permanente. Entre os mais conhecidos estão os seguintes (Partl et al. 2013; Martinho 2014): *French Wheel Tracking Tester (FWTT)*, *Small-scale UK Wheel*

Tracking Tester, Hamburg Wheel Tracking Device (HWTD), Superfos Construction Rut Tester, Evaluator of Rutting and Stripping in Asphalt (ERSA), Georgia Loaded Wheel Tester (GLWT), Asphalt Pavement Analyzer (APA), Purdue University Laboratory Wheel Tracking Test, Slab Testing Facilities (STFs).

Neste trabalho optou-se pelo ensaio *Wheel Tracking* por este ser constituído por um equipamento relativamente simples, bastante utilizado nas instituições portuguesas, que permite efetuar uma excelente caracterização das misturas betuminosas à deformação permanente.

4.5.1.1 Descrição do Procedimento Experimental – Wheel Tracking Test

A avaliação da resistência à deformação permanente das misturas MBR-BA e AC14 Surf, como referido anteriormente, foi efetuada recorrendo ao ensaio *Wheel Tracking* preconizado na norma EN 12697-22 (CEN 2003a). Neste ensaio é avaliada a suscetibilidade dum material betuminoso à deformação, através da medição da profundidade de rodeira formada por passagens repetidas de uma roda carregada, a uma determinada temperatura constante. As lajes usadas nos ensaios podem ser moldadas a partir de misturas produzidas em laboratório ou de misturas fabricadas em central (Morea & Zerbino 2015).

Este ensaio pode ser realizado recorrendo a três tipos alternativos de dispositivos de ensaio: dispositivos de muito grande porte (*extra large-size devices*), dispositivos de grande porte (*large-size devices*) e dispositivos de pequeno porte (*small-size devices*). Nos dispositivos de grande e muito grande porte os provetes são acondicionados ao ar durante o ensaio. Nos dispositivos de pequeno porte os provetes podem ser acondicionados ao ar, procedimento B, ou em água, procedimento A (CEN 2003a; Martins & Ribeiro 2012; Benta et al. 2015). Neste trabalho foi utilizado o dispositivo de pequeno porte com os provetes acondicionados ao ar, ou seja, procedimento B da norma EN 12697-22.

De acordo com a norma EN 12697-22, para a realização do ensaio *Wheel Tracking*, recorrendo a dispositivos de pequeno porte, devem ser produzidas lajes em molde retangular com o mínimo de 30 cm por lado. Como mostra o Quadro 4.18, a espessura das lajes deve variar em função da dimensão máxima dos agregados utilizados na mistura betuminosa.

Quadro 4.18 – Espessura das lajes para dispositivos de pequeno porte (procedimento B)

Espessura da laje (mm)	Dimensão máxima dos agregados, D (mm)
25	$D < 8$
40	$8 \leq D < 16$
60	$16 \leq D \leq 22$
80	$22 < D \leq 32$

Uma vez que, nem a mistura betuminosa MBR-BA, nem a mistura betuminosa AC14 Surf, têm agregados com dimensões superiores a 16 mm, assumiu-se uma espessura de 60 mm para as lajes utilizadas no ensaio *Wheel Tracking*. Desta forma, foram realizadas lajes com as dimensões de 300x400x60 mm³. Estas foram preparadas, utilizando o equipamento *Roller Compacter*, de acordo com a norma EN 12697-33 (CEN 2003b). Na Figura 4.8 apresentam-se fotografias do equipamento *Roller Compacter* e da mistura betuminosa antes (no misturador automático de laboratório) e depois (no molde metálico) da compactação.



Figura 4.8 – Execução das lajes betuminosas

Para cada tipo de mistura betuminosa, de acordo com a norma EN 12697-22, foram aplicados 10 000 ciclos de carga a um mínimo de 2 lajes (procedimento B), dando-se o ensaio por terminado quando se atingiu este valor ou quando a profundidade da rodeira atingiu 20 mm. Os principais resultados do ensaio de pista foram a média da variação da deformação permanente ao ar – *Wheel Tracking Slope in air* (WTS_{AIR}), a média proporcional da

profundidade da rodeira nos dois provetes ensaiados – *Mean Proportional Rut Depth in air* (PRD_{AIR}) e a profundidade média da rodeira – *Mean Rut Depth in air* (RD_{AIR}).

De acordo com o CET EP (EP 2014), a temperatura de ensaio foi de 60°C. Foi garantido, antes do início da execução do ensaio de pista, o acondicionamento das lajes, a uma temperatura também de 60°C, durante o mínimo de 4 horas. Este tempo de acondicionamento teve em consideração o estipulado pela norma EN 12697-22 (CEN 2003a) que estabelece um tempo de acondicionamento mínimo, à temperatura do ensaio, de 4 horas para lajes com espessura igual ou inferior a 60 mm. Também de acordo com a mesma norma, não foi ultrapassado o tempo de acondicionamento máximo de 24 horas.

4.5.1.2 Resultados do Ensaio Wheel Tracking

Apresentam-se, no Quadro 4.19, para as percentagens de betume de 7,5%, 8,0% e 8,5%, a espessura média e a baridade geométrica das lajes da mistura MBR-BA. Uma vez que as lajes foram compactadas em molde metálico indeformável, as dimensões em planta das lajes mantiveram-se invariáveis, ou seja, com 400x300mm².

Quadro 4.19 – Caracterização geométrica das lajes da mistura MBR-BA

% Betume	Espessura média dos lados, (mm)				Esp. Média (mm)	Esp. Nomina l (mm)	Desvi o (%)	Massa (g)	Baridade Geométric a (g/cm ³)
	e ₁	e ₂	e ₃	e ₄					
7,5%	60,3 9	61,62	60,05	60,92	60,61	60,00	1,0%	15621	2,148
	60,5 7	61,50	60,76	60,98	60,91	60,00	1,5%	15529	2,124
8,0%	60,8 4	61,44	60,92	62,45	61,31	60,00	2,2%	15623	2,123
	60,9 4	61,43	60,76	62,39	61,25	60,00	2,1%	15595	2,122
8,5%	61,8 0	62,58	61,70	62,33	62,02	60,00	3,4%	15520	2,085
	61,8 6	61,97	61,58	62,54	62,54	60,00	3,2%	15521	2,089

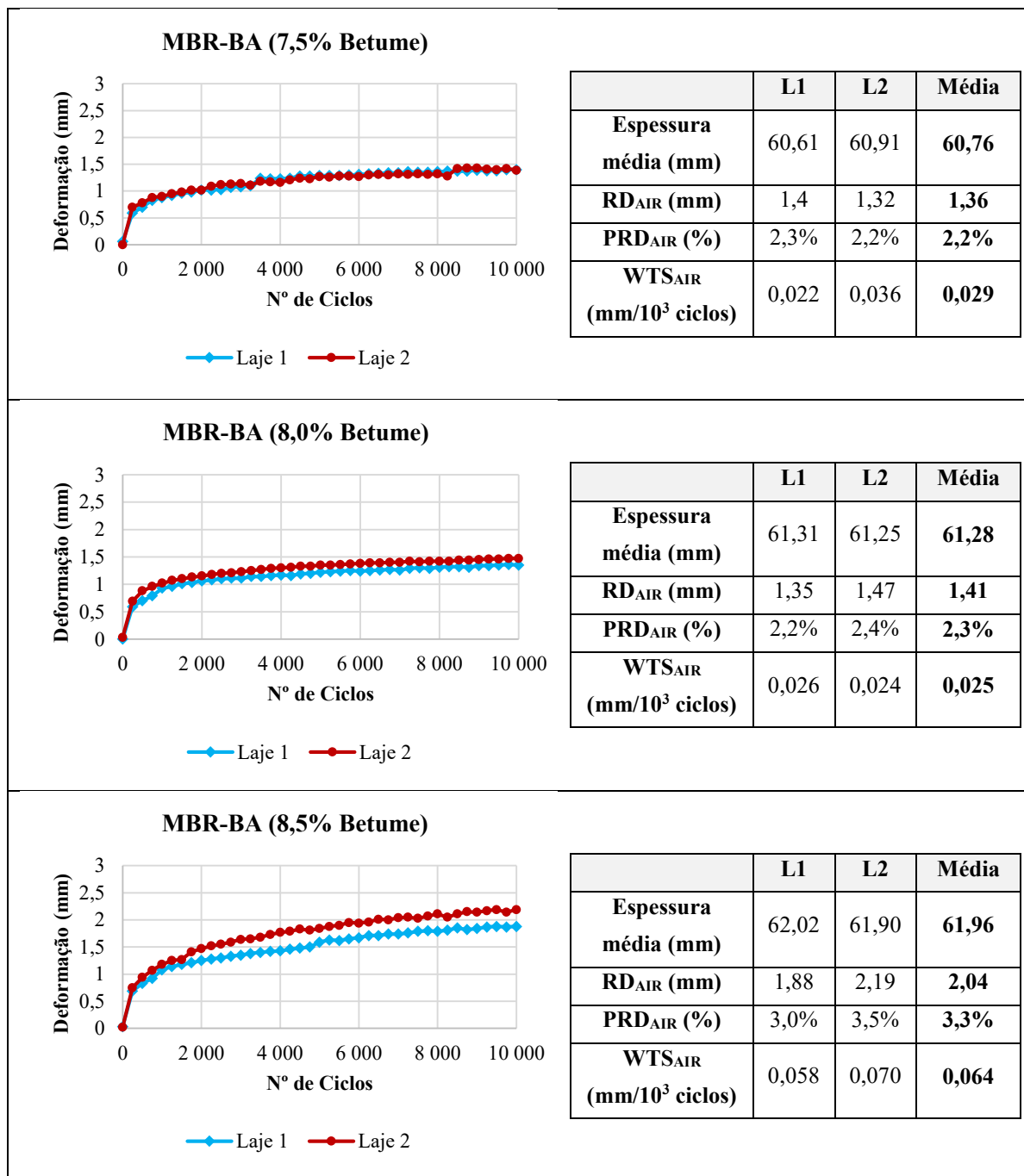
Também para as lajes da mistura MBR-BA, e para as mesmas percentagens de betume, são apresentados, no Quadro 4.20 e no Quadro 4.21, os resultados do ensaio *Wheel Tracking*. Apresenta-se ainda, na Figura 4.9, a fotografia da rodeira resultante deste ensaio a duas lajes desta mistura betuminosa.

Quadro 4.20 – Resultados do ensaio *Wheel Tracking* à mistura MBR-BA

% Betume	Laje	Espessura Laje (mm)	Final do ensaio		RD _{AIR} (mm)	PRD _{AIR} (%)	WTS _{AIR} (mm/10 ³ ciclos)
			Duração (min)	Nº ciclos			
7,5%	L1	60,61	383	10000	1,40	2,3%	0,022
7,5%	L2	60,98	383	10000	1,32	2,2%	0,036
Média		60,80	383	10000	1,36	2,2%	0,029
8,0%	L1	61,31	383	10000	1,35	2,2%	0,026
8,0%	L2	61,25	383	10000	1,47	2,4%	0,024
Média		61,28	383	10000	1,41	2,3%	0,025
8,5%	L1	62,02	383	10000	1,88	3,0%	0,058
8,5%	L2	62,54	383	10000	2,19	3,5%	0,070
Média		62,28	383	10000	2,04	3,3%	0,064

Dos resultados do ensaio *Wheel Tracking* à mistura MBR-BA verifica-se que, para ambas as percentagens de betume são cumpridos os limites do CET EP, ou seja, para o betume 35/50, a média da variação da deformação permanente ao ar (WTS_{AIR}) é inferior a 0,08 mm e a média proporcional da profundidade da rodeira (PRD_{AIR}) é inferior a 6,0%. Verifica-se ainda que, para ambas as percentagens de betume, a profundidade média da rodeira (RD_{AIR}) é bastante inferior a 20 mm (valor que define a paragem antecipada do ensaio *Wheel Tracking*).

Quadro 4.21 – Resumo dos resultados do ensaio *Wheel Tracking* à mistura MBR-BA



Do Quadro 4.21, verifica-se que, para cada percentagem de betume, as lajes betuminosas apresentam uma curva de deformação muito próxima. Tal facto poderá estar associado ao cuidado que se teve com a pesagem e acondicionamento de cada tipo de material, em especial o betume asfáltico e as diferentes frações de agregado, e com a mistura e compactação dos materiais.



Figura 4.9 – Rodeira em lajes da mistura MBR-BA

Apresenta-se, no Quadro 4.22, para as percentagens de betume de 4,5%, 5,0% e 5,5%, a espessura média e a baridade geométrica das lajes da mistura betuminosa AC14 Surf. As dimensões, em planta, das lajes desta mistura mantiveram-se igualmente invariáveis, ou seja, com 400x300mm².

Quadro 4.22 – Caracterização geométrica das lajes da mistura AC14 Surf

% Betume	Espessura média dos lados (mm)				Esp. Média (mm)	Esp. Nominal (mm)	Desvio (%)	Massa (g)	Baridade Geométrica (g/cm ³)
	e ₁	e ₂	e ₃	e ₄					
4,5%	62,61	68,26	62,08	64,34	63,87	60,00	6,5%	16693	2,178
	62,64	65,98	62,23	65,58	63,73	60,00	6,2%	16725	2,187
5,0%	61,36	62,75	60,74	63,32	61,78	60,00	3,0%	16499	2,225
	60,72	62,37	60,45	62,58	61,31	60,00	2,2%	16521	2,245
5,5%	61,92	62,46	61,42	62,74	61,99	60,00	3,3%	16493	2,217
	60,22	61,47	60,16	60,02	60,41	60,00	0,7%	15609	2,153

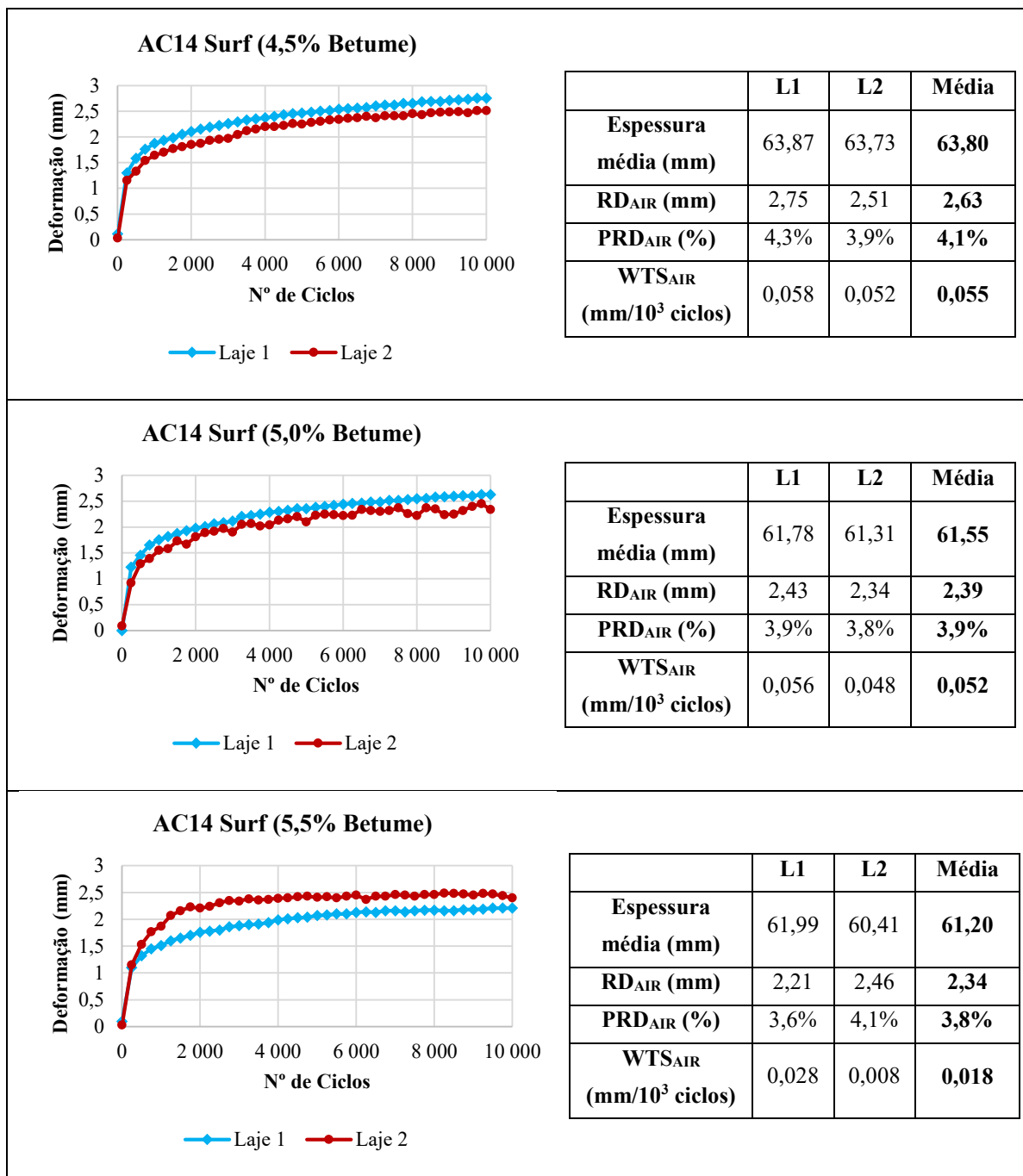
Também para as lajes da mistura betuminosa AC14 Surf, e para as mesmas percentagens de betume, são apresentados, no Quadro 4.23 e no Quadro 4.24, os resultados do ensaio *Wheel Tracking*. Apresenta-se ainda, na Figura 4.10, a fotografia da rodeira resultante deste ensaio a duas lajes desta mistura betuminosa.

Quadro 4.23 – Resultados do ensaio *Wheel Tracking* à mistura AC14 Surf

% Betume	Laje	Espessura Laje (mm)	Final do ensaio		RD _{AIR} (mm)	PRD _{AIR} (%)	WTS _{AIR} (mm/10 ³ ciclos)
			Duração (min)	Nº ciclos			
4,5%	L1	63,87	383	10000	2,75	4,3%	0,058
4,5%	L2	63,73	383	10000	2,51	3,9%	0,052
Média		63,80	383	10000	2,63	4,1%	0,055
5,0%	L1	61,78	383	10000	2,43	3,9%	0,056
5,0%	L2	61,31	383	10000	2,34	3,8%	0,048
Média		61,55	383	10000	2,39	3,9%	0,052
5,5%	L1	61,99	383	10000	2,21	3,6%	0,028
5,5%	L2	60,41	383	10000	2,46	4,1%	0,008
Média		61,20	383	10000	2,34	3,8%	0,018

Para a mistura AC14 Surf o CET EP não fixa limites para os parâmetros WTS_{AIR}, PRD_{AIR} e RD_{AIR}. Verifica-se que, para ambas as percentagens de betume, a profundidade média da rodeira (RD_{AIR}) é bastante inferior a 20 mm (valor que define a paragem antecipada do ensaio *Wheel Tracking*).

Quadro 4.24 – Resumo dos resultados do ensaio *Wheel Tracking* à mistura AC14 Surf



Do Quadro 4.24, verifica-se que, também, para cada percentagem de betume esta mistura betuminosa, as lajes apresentam uma curva de deformação muito próxima. Tal facto poderá, também, estar associado ao cuidado que se teve com todas as etapas do procedimento experimental.

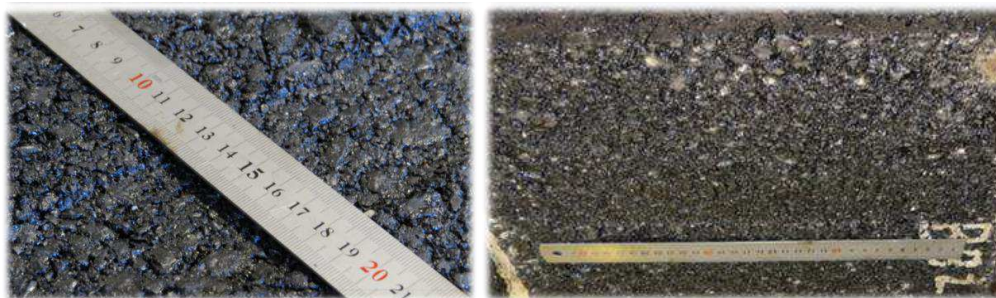


Figura 4.10 – Rodeira em lajes da mistura AC14 Surf

De forma a poder comparar a resistência à deformação permanente das misturas MBR-BA e AC14 Surf, apresentam-se, no Quadro 4.25, um quadro resumo dos resultados do ensaio *Wheel Tracking* para as percentagens ótimas em betume

Quadro 4.25 – Resultados do ensaio *Wheel Tracking* para as percentagens ótimas em betume

MBR-BA							
% Betume	Laje	Espessura Laje (mm)	Final do ensaio		RDAIR (mm)	PRDAIR (%)	W TSAIR (mm/10 ³ ciclos)
			Duração (min)	Nº ciclos			
8,0%	L1	61,31	383	10000	1,35	2,2%	0,026
8,0%	L2	61,25	383	10000	1,47	2,4%	0,024
Média		61,28	383	10000	1,41	2,3%	0,025
AC14 Surf							
% Betume	Laje	Espessura Laje (mm)	Final do ensaio		RDAIR (mm)	PRDAIR (%)	W TSAIR (mm/10 ³ ciclos)
			Duração (min)	Duração (min)			
5,0%	L1	61,78	383	10000	2,43	3,9%	0,056
5,0%	L2	61,31	383	10000	2,34	3,8%	0,048
Média		61,55	383	10000	2,39	3,9%	0,052

Para as mesmas misturas e também para as percentagens ótimas em betume, apresentam-se, na Figura 4.11, as curvas de deformação permanente resultantes do ensaio *Wheel Tracking*.

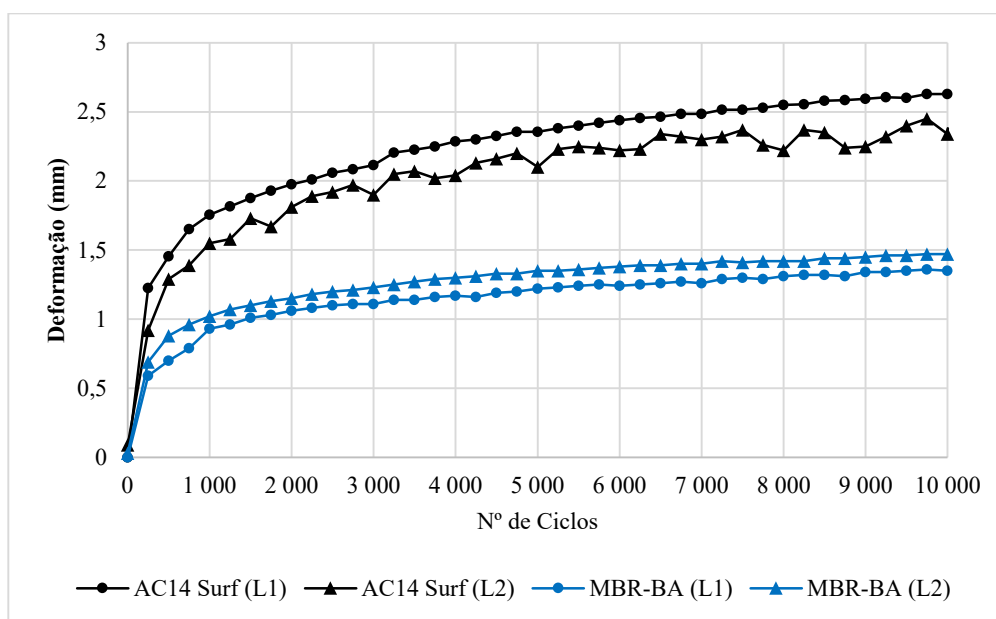


Figura 4.11 – Deformação permanente para as percentagens ótimas em betume

Do Quadro 4.25 e da Figura 4.11 verifica-se que a mistura AC14 Surf, na percentagem ótima de betume (5,0%), em relação à mistura MBR-BA, também na percentagem ótima em betume (8,0%), apresenta cerca do dobro da média da variação da deformação permanente ao ar (WTS_{AIR}). O mesmo acontece para os valores da média proporcional da profundidade da rodeira (PRD_{AIR}) e da profundidade média da rodeira (RD_{AIR}). Deve sublinhar-se que apesar dessa verificação, os valores são baixos em ambos os casos.

No que respeita à resistência à deformação permanente pode concluir-se que a mistura MBR-BA apresentou um melhor comportamento do que a mistura AC14 Surf, embora ressalvando que genericamente ambas as misturas podem ser consideradas como tendo apresentado um comportamento muito bom à deformação permanente.

Esta melhoria estará associada à maior viscosidade do betume-borracha em relação ao betume convencional, que contribui para uma menor deformação por corte da mistura para uma temperatura elevada.

4.5.2 Comportamento à Fadiga

Os principais ensaios utilizados para a avaliação da resistência ao fendilhamento por fadiga das misturas betuminosas são (Silva 2005):

- ensaios de flexão simples:
 - vigas simplesmente apoiadas, sujeitas a cargas pulsatórias ou sinusoidais, com carregamento central num ou em dois pontos;
 - vias em consola, de forma trapezoidal ou cilíndrica, sujeitas a carregamento sinusoidal na extremidade livre;
- ensaios de flexão com apoio, em lajes ou vigas sujeitas a cargas repetidas (as lajes ou as vigas são colocadas sobre apoios flexíveis, em todo o seu comprimento, para simular um estado de tensão mais representativo do que ocorre *in situ*);
- ensaios de tração simples, com aplicação de cargas pulsatórias ou sinusoidais a provetes cilíndricos, na direção perpendicular às bases do provete;
- ensaios de compressão diametral (tração indireta), com aplicação de cargas pulsatórias de compressão a provetes cilíndricos, numa direção diametral;
- ensaios de fratura, sobre provetes com fenda induzida, utilizando os princípios da mecânica da fratura para prever a vida à fadiga;
- ensaios de torção em consola com cargas pulsatórias ou sinusoidais;
- ensaios à escala real, em troços experimentais de pavimentos reais sujeitos a tráfego controlado, ou em pistas laboratoriais lineares ou circulares.

A maioria dos métodos utilizados para a previsão do desempenho do comportamento das misturas betuminosas à fadiga foi desenvolvida a partir de ensaios de flexão simples. Nestes ensaios, uma determinada tensão ou extensão é aplicada repetidamente até que ocorra a ruína do provete, ou até que a mistura betuminosa exiba mudanças nas suas propriedades mecânicas que se traduzam num comportamento inadequado (Silva 2005).

Estes ensaios de fadiga, que são do tipo destrutivo, podem realizar-se em extensão controlada ou em tensão controlada. Nos ensaios realizados em extensão controlada é imposta a amplitude do deslocamento, correspondente à extensão pretendida, diminuindo a tensão ao longo do ensaio. Nos ensaios com extensão controlada o ensaio é terminado 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 (Figura 4.12). Neste caso, o final do ensaio coincide com a rotura do provete (Baptista 2006).

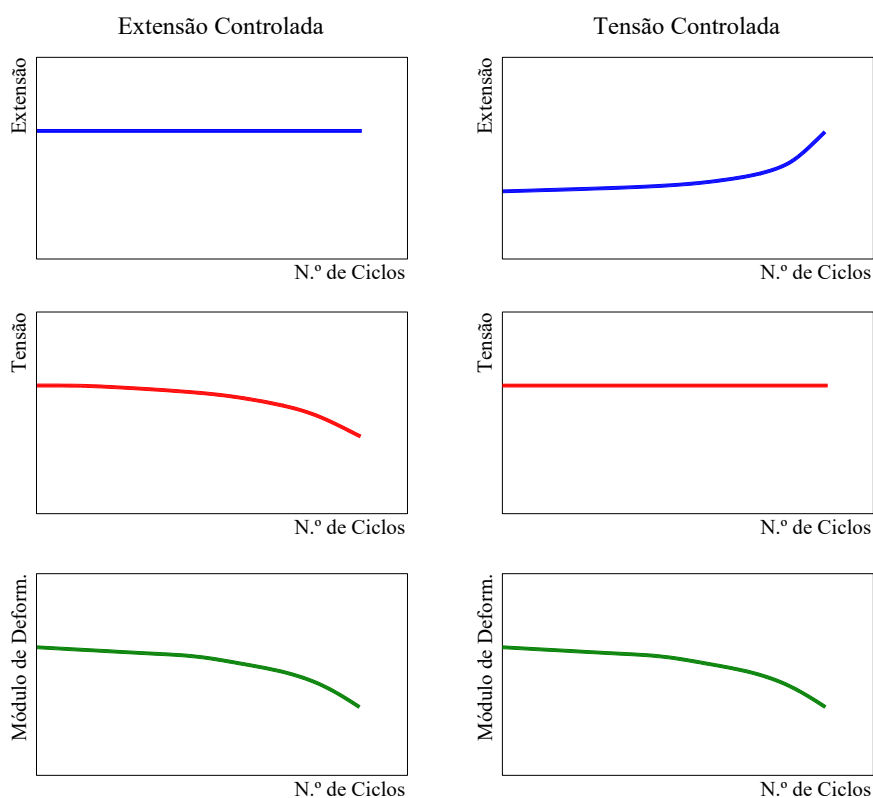
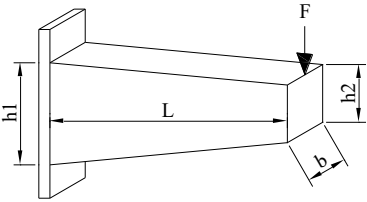
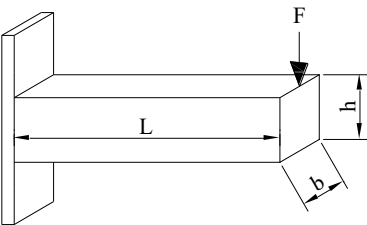
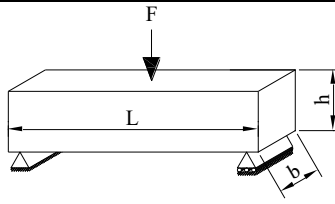
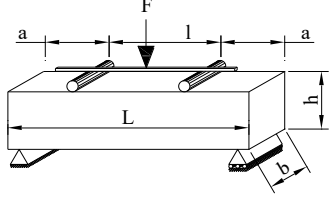
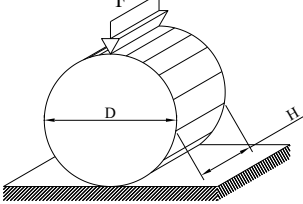


Figura 4.12 - Evolução típica da tensão, da extensão e do módulo de deformabilidade, em ensaios de fadiga em extensão controlada e em tensão controlada, Baptista (2006)

A norma EN12697-24 (CEN 2004a) indica cinco tipos de ensaios de caracterização da resistência à fadiga: ensaio de flexão em dois pontos com provetes trapezoidais, ensaio de flexão em dois pontos com provetes prismáticos, ensaio de flexão em três pontos com provetes prismáticos, ensaio de flexão em quatro pontos com provetes prismáticos e ensaio de tração indireta em provetes cilíndricos (Quadro 4.26).

Quadro 4.26 – Tipos de ensaios de fadiga, adaptado de (CEN 2004b)

Tipo de ensaio		Esquema do ensaio
Ensaio de flexão em dois pontos em provete prismático trapezoidal	2PB-TR (<i>two-point bending test on trapezoidal specimens</i>)	
Ensaio de flexão em dois pontos em provete prismático retangular	2PB-PR (<i>two-point bending test on prismatic shaped specimens</i>)	
Ensaio de flexão em três pontos em provete prismático retangular	3PB-PR (<i>three-point bending test on prismatic shaped specimens</i>)	
Ensaio de flexão em quatro pontos em provete prismático retangular	4PB-PR (<i>four-point bending test on prismatic shaped specimens</i>)	
Ensaio de tração indireta ou compressão diametral em provete cilíndrico	IT-CY (<i>Indirect tensile test on cylindrical shaped specimens</i>)	

O ensaio considerado neste trabalho, para a avaliação da resistência à fadiga das misturas betuminosas com e sem borracha, foi o ensaio de flexão em quatro pontos com provetes prismáticos (Figura 4.13), à temperatura de 20°C e com extensão controlada. Desta forma, descreve-se, de seguida e de acordo com a norma EN12697-24, o ensaio de flexão em quatro pontos (CEN 2004a).

No ensaio de flexão em quatro pontos, a norma EN12697-24 recomenda que as dimensões da secção dos provetes prismáticos (vigas), b e h , sejam no mínimo iguais ao triplo de D_{\max}

(dimensão máxima do agregado das misturas betuminosas) e que a distância entre os apoios, L , seja igual a cerca de seis vezes o maior dos valores de b e h .



Figura 4.13 – Unidade de flexão do ensaio de flexão em quatro pontos

Neste ensaio, a parte central da viga, entre os pontos de aplicação de carga, encontra-se sujeita a momento-fletor constante. Tal facto constitui uma vantagem visto que, na mesma zona da viga, a extensão também é constante. É, assim, 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 (Picado-Santos et al. 2010).

De acordo com a Figura 4.14, os apoios são dispostos de forma simétrica em relação à secção de meio-vão do provete. O carregamento é aplicado por meio dos dois apoios interiores, que se localizam, respetivamente, a um terço e a dois terços do comprimento entre os dois apoios exteriores. O carregamento aplicado deve ser constante e igual em ambos os apoios interiores. Os dois apoios exteriores têm posição vertical fixa. Todos os apoios devem permitir livre rotação e translação horizontal do provete (Crucho 2011; CEN 2004a; Pais et al. 2002).

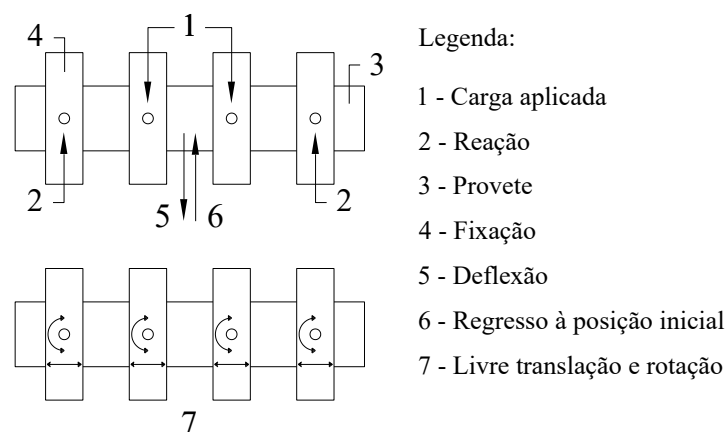


Figura 4.14 – Esquema do ensaio à flexão em quatro pontos, adaptado CEN (2004a)

A avaliação da resistência à fadiga é, normalmente, efetuada para uma frequência, uma temperatura e três níveis de extensão. Segundo a norma EN12697-26 (CEN 2004b), para a avaliação do módulo de deformabilidade, realizada no domínio das pequenas deformações, as temperaturas podem variar entre os -30°C e os 40°C e a frequência de ensaio deve incluir os seguintes valores: 0,1 Hz, 0,2 Hz, 0,5 Hz, 1 Hz, 2 Hz, 5 Hz, 10 Hz, 20 Hz, 50 Hz.

De acordo com a norma EN12697-26, no tratamento dos resultados dos ensaios, as componentes do módulo complexo calculam-se pelas seguintes expressões:

$$E_1 = C \times \left(\frac{\Delta F}{\Delta \delta} \times \cos \phi + \frac{\mu_m}{10^6} \times f^2 \right) \quad (4.2)$$

$$E_2 = C \times \frac{\Delta F}{\Delta \delta} \times \sin \phi \quad (4.3)$$

Onde:

E_1 – componente elástica ou real do módulo complexo, MPa;

E_2 – componente imaginária do módulo complexo, MPa;

ϕ – ângulo de fase, em graus;

ΔF – amplitude da carga, N;

$\Delta \delta$ – amplitude do deslocamento, mm;

f – frequência de ensaio, Hz;

C – fator de forma que depende da forma do provete e do tipo de ensaio, mm^{-1} ;

μ_m – fator 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.

Contudo, nos ensaios clássicos com aplicação de cargas repetidas os efeitos de inércia são desprezáveis (Di Benedetto et al. 1998). Desta forma, tendo em conta que o módulo de deformabilidade, E_m , corresponde por definição ao valor absoluto do módulo complexo, desprezando os efeitos de inércia ($\mu_m = 0$), obtém-se (Baptista 2006; CEN 2004b):

$$E_m = |E^*| = \sqrt{(E_1)^2 + (E_2)^2} \cong C \times \frac{\Delta F}{\Delta \delta} \quad (4.4)$$

No ensaio de flexão em quatro pontos, para o cálculo do fator de forma, C , utiliza-se a seguinte expressão (CEN 2004b):

$$C = \frac{a \times (3 \times L^2 - 4 \times a^2)}{4 \times b \times h^3} \quad (4.5)$$

As variáveis a , b , h e L (em mm) da expressão (4.5) estão presentes no Quadro 4.26, na imagem descritiva do ensaio de flexão em quatro pontos.

O desfaseamento entre as ondas de tensão e de extensão, designado por ângulo de fase, ϕ , é determinado pela seguinte expressão:

$$\phi = \text{atan} \frac{E_2}{E_1} = \frac{t_i}{t_p} \times 360 \quad (4.6)$$

Onde:

t_i – intervalo de tempo entre um ciclo de carregamento e um ciclo de deslocamento, s;

t_p – duração dum ciclo de carregamento, s;

O fendilhamento por fadiga ocorre quando as misturas betuminosas, de comportamento viscoelástico, exibem predominantemente a sua componente elástica (a parte elástica do módulo de deformabilidade, E_1 , é superior à parte viscosa, E_2). Embora nesta fase, que ocorre para temperaturas de serviço baixas ou moderadas, as camadas betuminosas suportem razoavelmente bem a aplicação repetida de esforços de tração, a aplicação dum número

significativo de carregamentos origina uma perda de resistência das camadas betuminosas por fadiga, levando ao seu fendilhamento progressivo (Baptista 2006).

Este fenómeno tende a ocorrer tanto mais rapidamente quanto mais elevados forem os esforços de tração instalados. Desta forma, 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 de tração 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 (Baptista et al. 2013; Capitão & Picado-Santos 2006a):

$$\varepsilon_t = a \times N^b \quad (4.7)$$

Onde:

ε_t – extensão de tração induzida;

N – número de ciclos até atingir o critério de rotura;

a, b – constantes.

De acordo com o estipulado pela norma EN 12697-24 (CEN 2004a), com base nos resultados que representam a duração da vida à fadiga da mistura betuminosa, $N_{i,j,k}$, para o critério de rotura escolhido, j , e para o conjunto de condições de ensaio, k , a linha de fadiga deve ser desenhada fazendo uma regressão linear entre os logaritmos naturais de $N_{i,j,k}$ e os logaritmos naturais da amplitude inicial de deformação (amplitude de deformação ao 100º ciclo) tendo a seguinte forma:

$$\ln(N_{i,j,k}) = A_0 + A_1 \times \ln(\varepsilon_i) \quad (4.8)$$

Onde:

i – Número do provete

j – Critério de rotura escolhido

k – Conjunto das condições de ensaio

ε_i – Amplitude inicial de extensão medida no 100º ciclo de carga

A_1 – Estimativa da inclinação da linha de fadiga

A_0 – Estimativa do nível de carregamento, Q

4.5.2.1 Descrição do Procedimento Experimental -Four Point Bending Test

Como referido anteriormente, a caracterização da resistência à fadiga das misturas MBR-BA e AC14 Surf foi efetuada, de acordo com a norma EN12697-24 (CEN 2004a), recorrendo ao ensaio de flexão em quatro pontos com provetes prismáticos, à temperatura de 20°C e com extensão controlada.

Neste ensaio laboratorial existem algumas variáveis que influenciam muito os resultados obtidos. As mais importantes são a temperatura de ensaio, a frequência de aplicação de carga e o modo de aplicação de carga (Crucho 2011).

A frequência de aplicação de carga do ensaio deve simular a frequência provocada pelo tráfego na base das camadas betuminosas do pavimento. Esta será o inverso do tempo de aplicação de carga. Os tempos de aplicação de carga considerados em alguns casos práticos são os seguintes (Branco et al. 2006):

- Zonas de tráfego rápido: 0,01 a 0,1 segundos
- Zonas de aceleração e travagem: 0,1 a 1,0 segundos
- Zonas de estacionamento: 1,0 minuto a 10,0 horas

A frequência escolhida para o estudo experimental deste trabalho foi 10Hz. Este valor é dos mais frequentemente utilizados neste tipo de estudos, por se considerar adequado para avaliar a resistência à fadiga em pavimentos.

Durante o ensaio deve registar-se a força aplicada, a deflexão e o ângulo de fase entre a força e a deflexão. A resistência à fadiga do material foi determinada com base nestas medições.

O equipamento utilizado para a realização do ensaio de flexão em quatro pontos às misturas betuminosas MBR-BA e AC14 Surf foi o *Stand-Alone 4 Point Beam Fatigue*, fabricado pela *Cooper Research Technology* (CRT). Este equipamento foi desenvolvido de forma a verificar as exigências da norma EN 12697-24:2004. A descrição deste equipamento segue as linhas deixadas por Crucho, (2011) que, no Laboratório de Vias de Comunicação e Transportes (LVCT) do Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa, IST, instalou e recolheu os primeiros resultados dos ensaios realizados com o mesmo.

Além do computador e respetivo software necessário à realização do ensaio, o equipamento é constituído pela unidade de controlo, pelo reservatório de ar comprimido, pela unidade de flexão, pela unidade de aquisição de dados e pela câmara climática.

A unidade de controlo, Figura 4.15 (a), recebe instruções do software e controla a unidade de flexão e o reservatório de ar comprimido. A esta unidade estão ligados todos os instrumentos de medida, como sejam a célula de carga e os LVDTs, e possui duas sondas de temperatura (RTDs) que se dispõem junto à unidade de flexão e ao provete de forma a registar a temperatura de ensaio. Os dados de leitura são, posteriormente, enviados para a unidade de aquisição de dados que por sua vez os transmite ao computador. É também na unidade de controlo que se localizam os comandos manuais que operam os mecanismos de fixação e controlam a força de aperto aplicada ao provete.

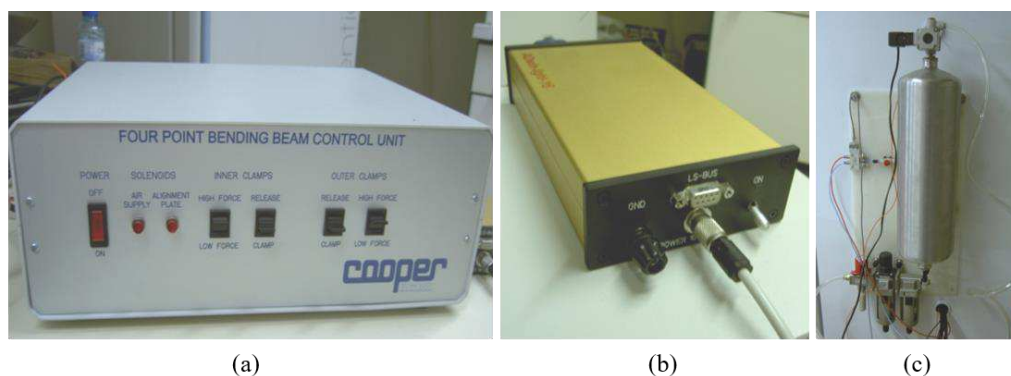


Figura 4.15 – Controlo (a), aquisição de dados (b) e reservatório de ar comprimido (c)

O reservatório de ar comprimido, Figura 4.15 (c), realiza a admissão de ar da rede de ar pressurizado e efetua a alimentação de ar pressurizado à unidade de flexão. Este é munido de uma válvula que controla a admissão de ar.

A unidade de aquisição de dados, Figura 4.15 (b), efetua a comunicação entre a unidade de controlo e o computador. Esta transmite as leituras recebidas na unidade de controlo ao computador que, por sua vez, as irá registar e, de seguida, transmitir as instruções do software à unidade de controlo.

A unidade de flexão, Figura 4.16 (a), onde o provete é posicionado para ser ensaiado, é composta pelo quadro de flexão, dispositivos de fixação, LVDT do provete, LVDT do atuador, atuador e célula de carga.

No computador, o software de ensaio gera um ficheiro de dados onde são apresentados os resultados do ensaio. Neste ficheiro é registado o número de ciclos, a percentagem do módulo de deformabilidade inicial, o módulo de deformabilidade, a extensão, a tensão, a carga aplicada, a deformação, a energia dissipada, o ângulo de fase e a temperatura.

A câmara climática utilizada, apresentada na Figura 4.16 (b), também fabricada pela *Cooper Research Technology*, permite uma regulação de temperatura no intervalo de 5°C a 60°C, com uma exatidão na regulação de 0,1°C.

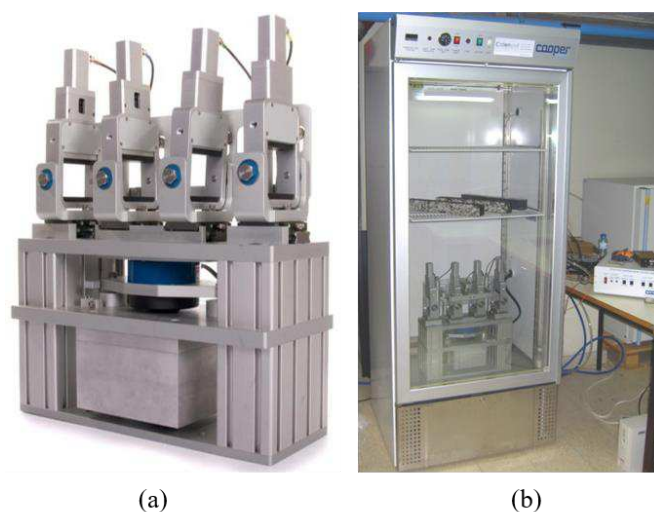


Figura 4.16 – Unidade de flexão (a) e câmara climática (b)

O provete é submetido a um carregamento sinusoidal, oscilando em torno de zero. Apresenta-se, na Figura 4.17, a forma como o carregamento é aplicado no provete durante o ensaio. Na situação a vermelho o provete está a ser fletido para baixo, enquanto na situação a azul o provete está a ser fletido para cima.

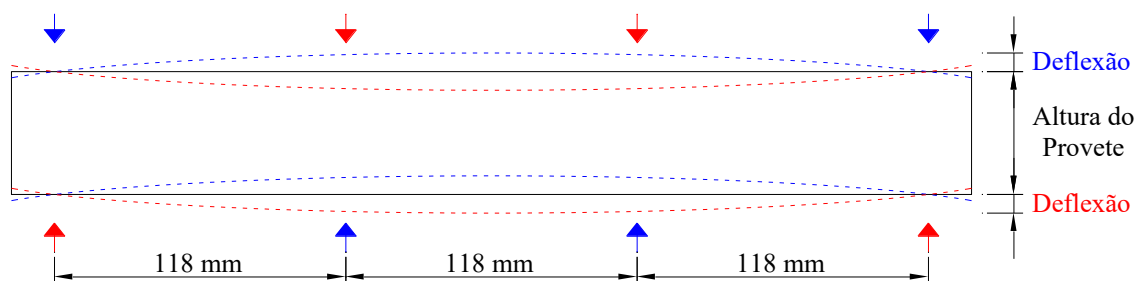


Figura 4.17 – Esquema da aplicação do carregamento sinusoidal, adaptado de Crucho (2011)

4.5.2.2 *Fabrico dos provetes de ensaio*

Os provetes de ensaio (vigas) foram obtidos recorrendo ao fabrico de quatro lajes de cada mistura betuminosa, MBR-BA e AC14 Surf. De cada laje foram serrados cinco provetes de secção aproximadamente quadrada com 5 cm de aresta, e 40 cm de comprimento.

Apresenta-se, de seguida, a descrição da preparação das misturas betuminosas e do fabrico das lajes e dos provetes de ensaio.

Após a preparação e aquecimento das quantidades necessárias de cada material, procedeu-se à sua mistura a quente no *Controls BITUMIX*, um misturador automático de laboratório (Figura 4.18).



Figura 4.18 – Misturador *Controls BITUMIX*

Após o processo de amassadura da mistura betuminosa, esta foi compactada num molde de aço, de dimensões em planta de 300x400 mm², que conferiu as dimensões finais da laje (Figura 4.19).



Figura 4.19 – Molde da laje com a mistura betuminosa compactada

De acordo com o estipulado pela norma EN 12697-33 (2004-a), a compactação foi realizada no equipamento *Roller Compactor* (Figura 4.20).

No caso da mistura betuminosa MBR-BA, antes da compactação, foi garantido o tempo de iteração física entre o betume e a borracha de acordo com o descrito em 4.4.1.

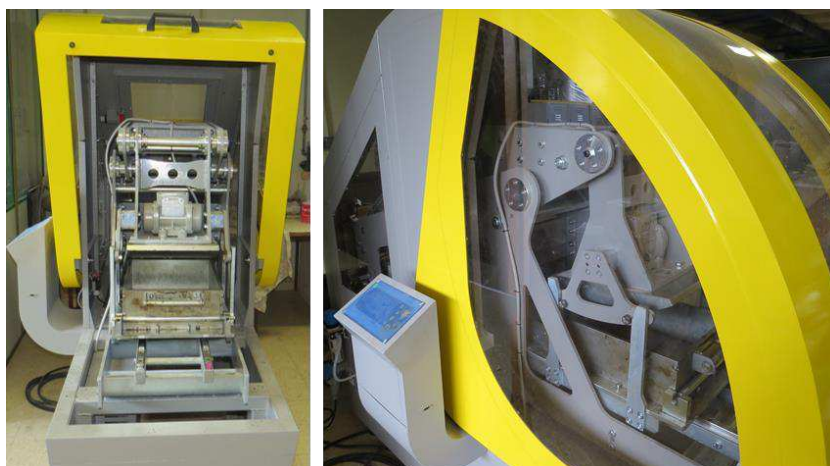


Figura 4.20 – Equipamento de compactação *Roller Compactor*

Findos a compactação e o arrefecimento da mistura, a laje foi desmoldada e armazenada até à data de corte. O corte da laje em vigas realizou-se uma semana após o fabrico da mesma (Figura 4.21).



Figura 4.21 – Laje betuminosa antes e depois do corte em provetes

As lajes foram cortadas de modo que as dimensões das vigas obedecessem ao disposto na norma EN 12697-24 (CEN 2004a). No que refere à caracterização da vida à fadiga, esta norma estipula que as vigas sejam ensaiados entre a segunda e a oitava semana após o corte, o que foi garantido neste trabalho.

4.5.2.3 Caracterização do módulo de deformabilidade

Segundo a norma EN 12697-24, se necessário um espectro de frequências para determinação do módulo complexo (rigidez), à temperatura de ensaio escolhida, este deve ser obtido antes do ensaio de fadiga. Este pequeno ensaio consiste na medição da resposta a frequências nominais de, por exemplo, 1Hz, 3Hz, 5Hz, 10Hz, 20Hz, 30Hz e 60Hz e subsequentemente a 1Hz. O modo de carregamento neste ensaio deve ser a extensão constante para uma amplitude máxima de deformação por flexão de 50 $\mu\text{m}/\text{m}$. Para cada frequência devem ser feitas pelo menos 200 repetições. Para prevenir danos por fadiga prematuros, o número total de aplicações para todas as frequências juntas não deve exceder 3000. A baixas temperaturas (até 10°C), deve existir um pequeno período de repouso de cerca de 10 min antes de se iniciar o ensaio de fadiga (CEN 2004a). Neste estudo, o período de repouso de 10 min não foi necessário, pois os ensaios de avaliação do módulo de deformabilidade e de fadiga foram efetuados a uma temperatura de 20°C.

A norma EN 12697-26 (CEN 2004b), dedicada à determinação do módulo de deformabilidade, propõe também uma gama de frequências de ensaio, especifica que a temperatura seja 20°C e que os ensaios sejam conduzidos a uma extensão controlada de 50 $\mu\text{m}/\text{m}$. Verifica-se então que as recomendações em ambos documentos são semelhantes. Uma vez que para a realização deste trabalho experimental se dispunha de número limitado de provetes foram seguidas as recomendações do documento relativo ao ensaio de fadiga. Desta forma, os provetes não se destinavam exclusivamente à realização do ensaio de caracterização do módulo de deformabilidade, sendo assim o mesmo provete, após o ensaio de caracterização do módulo de deformabilidade, ensaiado para caracterização da resistência à fadiga.

A frequência de 60Hz, para além de não ser representativa da velocidade de circulação dos veículos pesados, considerou-se que poderia causar o fendilhamento prematuro nos provetes, condicionando assim a sua resposta ao ensaio de fadiga. Desta forma, neste trabalho experimental, foram utilizadas as frequências de 1Hz, 3Hz, 5Hz, 10Hz, 20Hz e 30Hz, repetindo-se no final a frequência de 1Hz.

No Quadro 4.27, apresentam-se os resultados da caracterização geométrica das vigas da mistura MBR-BA para a percentagem ótima em betume (8%). Estas vigas estão numeradas de 1 a 5, em 4 grupos referentes ao número da laje de onde provêm.

Quadro 4.27 – Caracterização geométrica das vigas da mistura MBR-BA (8% de betume)

Viga	Altura, h (mm)					Largura, l (mm)				
	h ₁	h ₂	h ₃	h ₄	média	l ₁	l ₂	l ₃	l ₄	média
1.1	50,40	50,68	50,83	51,34	50,81	50,37	50,50	50,03	50,97	50,47
1.2	51,83	50,38	50,19	50,59	50,75	50,65	50,58	50,80	51,03	50,77
1.3	50,50	50,60	50,42	52,00	50,88	51,16	51,23	50,91	50,77	51,02
1.4	50,19	50,48	50,31	51,95	50,73	49,83	50,40	50,71	51,56	50,63
1.5	49,84	50,27	49,92	51,54	50,39	51,24	51,26	50,80	50,39	50,92
2.1	50,36	50,64	50,76	51,50	50,82	52,38	52,21	52,21	51,44	52,06
2.2	50,87	51,04	50,43	52,02	51,09	52,07	51,89	51,95	52,00	51,98
2.3	50,84	51,07	50,70	51,72	51,08	51,52	51,16	51,54	51,81	51,51
2.4	52,04	50,45	51,30	51,56	51,34	51,44	51,57	51,52	51,69	51,56
2.5	51,76	50,30	50,66	50,86	50,90	50,87	50,95	51,37	51,93	51,28
3.1	51,17	51,24	50,83	51,70	51,24	51,90	51,49	51,95	51,14	51,62
3.2	51,40	51,64	51,04	52,00	51,52	50,69	50,89	51,54	51,54	51,17
3.3	52,05	51,02	51,80	51,73	51,65	51,23	51,28	51,53	51,70	51,44
3.4	52,15	51,13	51,79	51,22	51,57	50,71	50,81	51,03	51,13	50,92
3.5	51,62	50,59	51,38	51,33	51,23	50,94	51,27	51,51	52,15	51,47
4.1	51,83	50,52	50,78	50,67	50,95	50,84	50,64	50,12	50,38	50,50
4.2	50,51	50,95	50,21	51,47	50,79	51,30	51,60	51,54	51,33	51,44
4.3	50,67	50,89	50,88	51,96	51,10	51,31	51,03	50,98	50,79	51,03
4.4	50,89	50,93	50,95	51,78	51,14	50,74	50,59	50,73	51,25	50,83
4.5	50,82	50,88	50,65	52,17	51,13	50,93	50,96	50,96	50,89	50,94

No Quadro 4.28, apresentam-se os resultados da média, do desvio padrão e do coeficiente de variação da baridade, da porosidade e do volume de vazios no esqueleto do agregado, VMA, das vigas da mistura MBR-BA, também para a percentagem ótima em betume (8,0%).

Quadro 4.28 – Média, desvio padrão e coeficiente de variação da baridade, da porosidade e do VMA das vigas da mistura MBR-BA

Vigas		Baridade (kg/m ³)	Porosidade (%)	VMA (%)
1.1 a 1.5	Média	2227,83	2,50	19,80
	Desvio Padrão	9,31	0,41	0,34
	Coeficiente de Variação	0,42	16,33	1,69
2.1 a 2.5	Média	2222,54	2,73	19,99
	Desvio Padrão	4,45	0,19	0,16
	Coeficiente de Variação	0,20	7,14	0,80
3.1 a 3.5	Média	2213,50	3,12	20,32
	Desvio Padrão	10,37	0,45	0,37
	Coeficiente de Variação	0,47	14,53	1,84
4.1 a 4.5	Média	2221,89	2,76	20,01
	Desvio Padrão	6,04	0,26	0,22
	Coeficiente de Variação	0,27	9,59	1,09
1.1 a 4.5 (totalidade)	Média	2221,44	2,78	20,03
	Desvio Padrão	8,97	0,39	0,32
	Coeficiente de Variação	0,40	14,15	1,61
Baridade máxima teórica = 2284,85 (kg/m ³); Temperatura água = 23,5°C				

Os módulos de deformabilidade das vigas da mistura MBR-BA, determinados à temperatura de 20°C, constam na Figura 4.22. Apresentam-se apenas as vigas que foram consideradas para a realização do ensaio de fadiga.

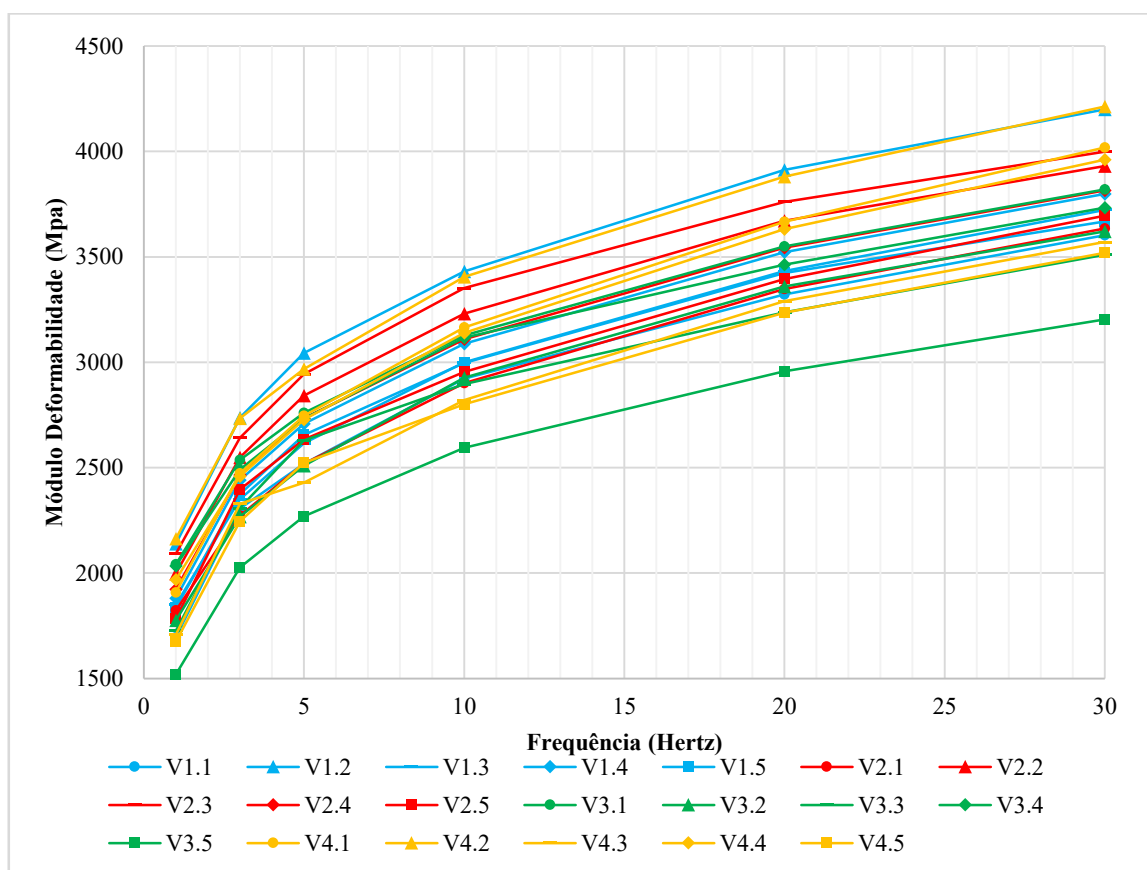


Figura 4.22 – Módulo de deformabilidade das vigas da mistura MBR-BA à temperatura de 20°C (8% de betume)

No Quadro 4.29, apresentam-se os resultados da caracterização geométrica das vigas da mistura AC14 Surf para a percentagem ótima em betume (5%). Estas vigas estão também numeradas de 1 a 5, em 4 grupos referentes ao número da laje de onde provêm.

Quadro 4.29 – Caracterização geométrica das vigas da mistura AC14 Surf (5% de betume)

Viga	Altura, h (mm)					Largura, l (mm)				
	h ₁	h ₂	h ₃	h ₄	média	l ₁	l ₂	l ₃	l ₄	média
1.1	51,95	52,09	51,60	52,41	52,01	48,32	48,16	48,85	48,59	48,48
1.2	52,03	52,03	51,50	52,76	52,08	48,16	48,41	48,41	48,40	48,35
1.3	53,30	51,40	52,26	51,87	52,21	49,15	48,77	49,02	49,08	49,01
1.4	51,81	51,96	51,40	52,71	51,97	49,54	49,87	49,76	49,70	49,72
1.5	52,03	52,45	51,50	52,58	52,14	48,49	48,75	48,89	49,15	48,82
2.1	51,84	51,96	51,48	52,44	51,93	49,15	49,15	48,79	48,78	48,97
2.2	52,61	51,18	51,61	51,64	51,76	48,89	48,87	48,90	49,09	48,94
2.3	52,86	51,36	51,98	51,57	51,94	49,46	49,34	49,31	49,45	49,39
2.4	51,82	51,79	51,60	52,55	51,94	49,84	49,21	49,36	49,16	49,39
2.5	52,62	51,26	51,75	51,73	51,84	49,26	49,36	49,51	49,88	49,50
3.1	53,67	51,83	51,92	51,53	52,24	52,13	52,25	51,48	51,05	51,73
3.2	51,56	52,24	52,05	53,03	52,22	51,19	51,10	51,38	51,84	51,38
3.3	52,00	52,18	52,08	53,32	52,40	50,86	51,28	51,15	51,53	51,21
3.4	51,70	52,06	51,69	53,38	52,21	51,36	51,46	51,44	51,34	51,40
3.5	53,35	51,45	51,71	51,12	51,91	51,05	50,96	51,03	51,08	51,03
4.1	52,61	51,59	51,38	51,21	51,70	51,66	51,57	51,41	51,76	51,60
4.2	52,28	51,62	51,88	51,71	51,87	51,11	51,45	51,64	52,04	51,56
4.3	51,66	51,87	51,82	51,68	51,76	52,11	51,89	51,96	51,71	51,92
4.4	51,77	51,99	51,78	51,95	51,87	52,02	51,65	51,42	51,59	51,67
4.5	52,44	51,82	52,08	51,75	52,02	51,33	51,26	50,69	49,84	50,78

No Quadro 4.30, apresentam-se os resultados da média, do desvio padrão e do coeficiente de variação da baridade, da porosidade e do volume de vazios no esqueleto do agregado, VMA, das vigas da mistura AC14 Surf, também para a percentagem ótima em betume (5,0%).

Quadro 4.30 – Média, desvio padrão e coeficiente de variação da baridade, da porosidade e do VMA das vigas da mistura AC14 Surf

Vigas		Baridade (kg/m ³)	Porosidade (%)	VMA (%)
1.1 a 1.5	Média	2309,96	4,50	15,72
	Desvio Padrão	3,64	0,15	0,13
	Coeficiente de Variação	0,16	3,34	0,84
2.1 a 2.5	Média	2301,45	4,84	16,02
	Desvio Padrão	5,55	0,23	0,20
	Coeficiente de Variação	0,24	4,74	1,26
3.1 a 3.5	Média	2297,36	5,01	16,16
	Desvio Padrão	3,96	0,16	0,14
	Coeficiente de Variação	0,17	3,27	0,89
4.1 a 4.5	Média	2297,72	5,00	16,15
	Desvio Padrão	1,90	0,08	0,07
	Coeficiente de Variação	0,08	1,57	0,43
1.2 a 4.5 (totalidade)	Média	2301,55	4,84	16,01
	Desvio Padrão	6,25	0,26	0,23
	Coeficiente de Variação	0,27	5,34	1,43
Baridade máxima teórica = 2418,58 (kg/m ³); Temperatura água = 20,5°C				

Os módulos de deformabilidade das vigas da mistura AC14 Surf, determinados à temperatura de 20°C, constam na Figura 4.23. Também aqui se apresentam apenas as vigas que foram consideradas para a realização do ensaio de fadiga.

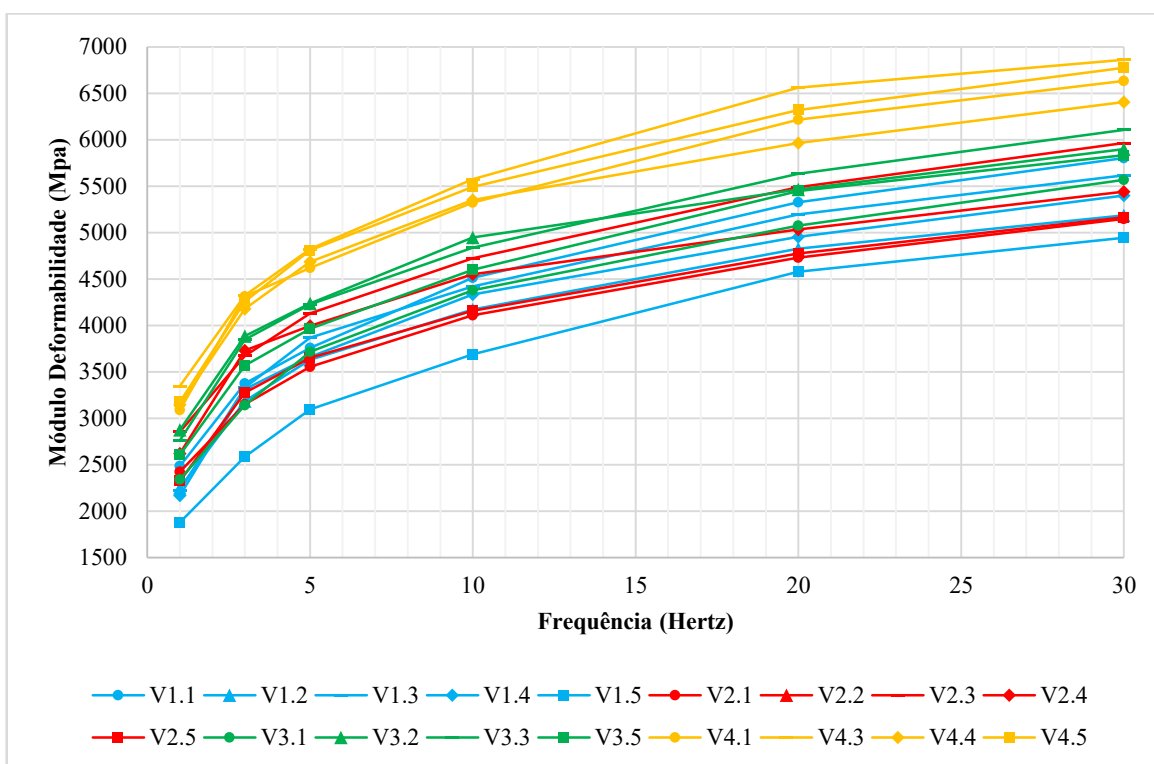


Figura 4.23 – Módulo de deformabilidade das vigas da mistura AC14 Surf à temperatura de 20°C (5% de betume)

Apresentam-se, na Figura 4.24, para a temperatura de ensaio de 20°C, os valores médios e os percentis de 5% e de 95% dos módulos de deformabilidade das vigas das misturas AC14 Surf e MBR-BA.

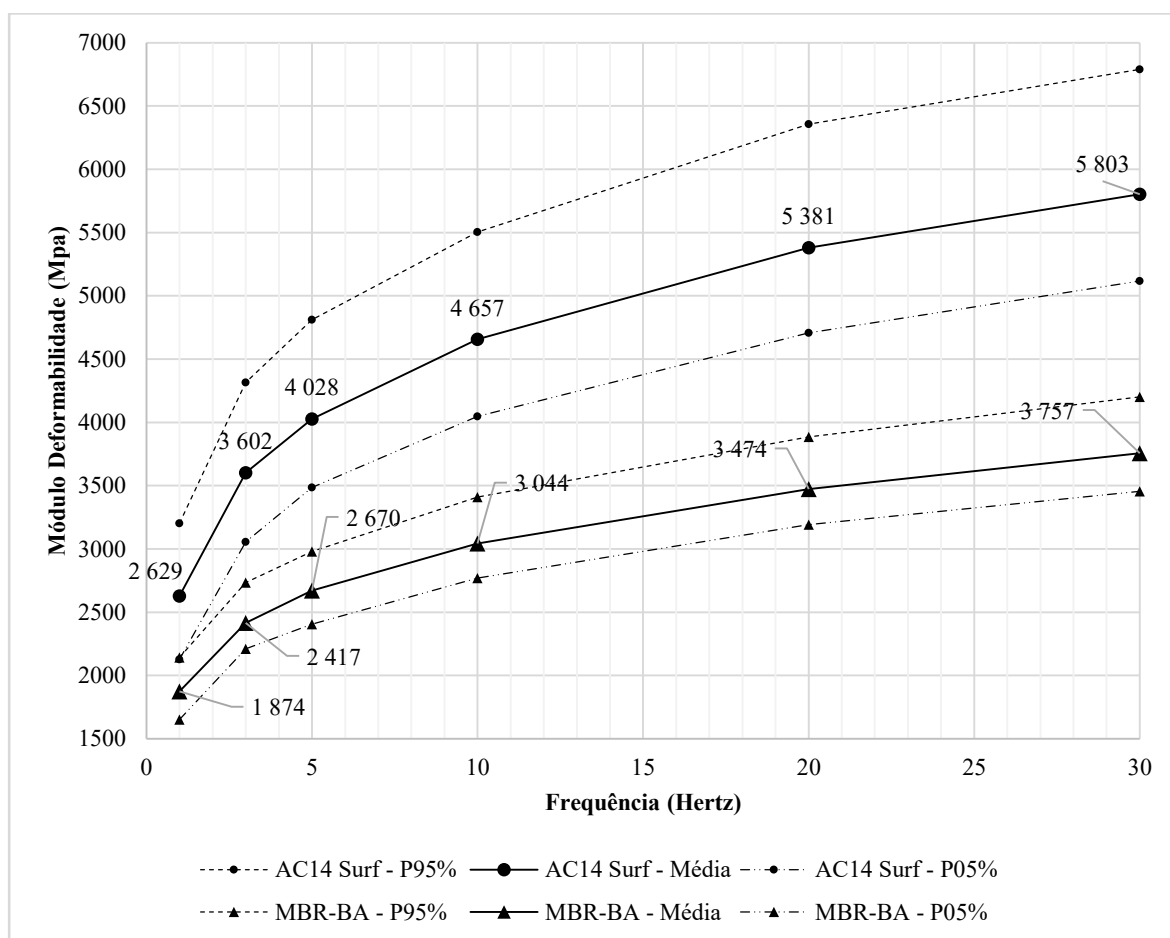


Figura 4.24 – Módulo de deformabilidade das vigas das misturas AC14 Surf e MBR-BA à temperatura de 20°C

Dos resultados apresentados anteriormente, verifica-se que, para todas as frequências estudadas, o módulo de deformabilidade da mistura betuminosa MBR-BA é inferior ao módulo de deformabilidade da mistura AC14 Surf. Tal ocorrência poderá estar relacionada com o facto de a mistura betuminosa MBR-BA, por possuir granulado de borracha, acomodar maior quantidade de ligante, traduzindo-se num comportamento mais flexível da mesma. Da análise das baridades e das porosidades das vigas também se poderão retirar inferências que permitam perceber melhor esta diferença dos módulos de deformabilidade das misturas betuminosas. Do Quadro 4.28 e do Quadro 4.30 verifica-se que as baridades das vigas da mistura MBR-BA não são muito inferiores às baridades das vigas da mistura AC14 Surf (cerca de 3% de diferença). No que respeita ao coeficiente de variação das baridades, ambas as misturas apresentam valores relativamente baixos (inferior a 1%). No que respeita às porosidades, estes valores já não são tão baixos, ou seja, o coeficiente de

variação das porosidades das vigas da mistura MBR-BA é superior a 15%, sendo cerca de três vezes superior ao da mistura AC14 Surf. Esta diferença mais acentuada estará relacionada com a presença do granulado de borracha na mistura MBR-BA que, de certa forma, poderá contribuir para uma compactação não tão eficiente.

Na Figura 4.25, apresenta-se, para a temperatura de ensaio de 20°C, o ângulo de fase médio das vigas das misturas AC14 Surf e MBR-BA.

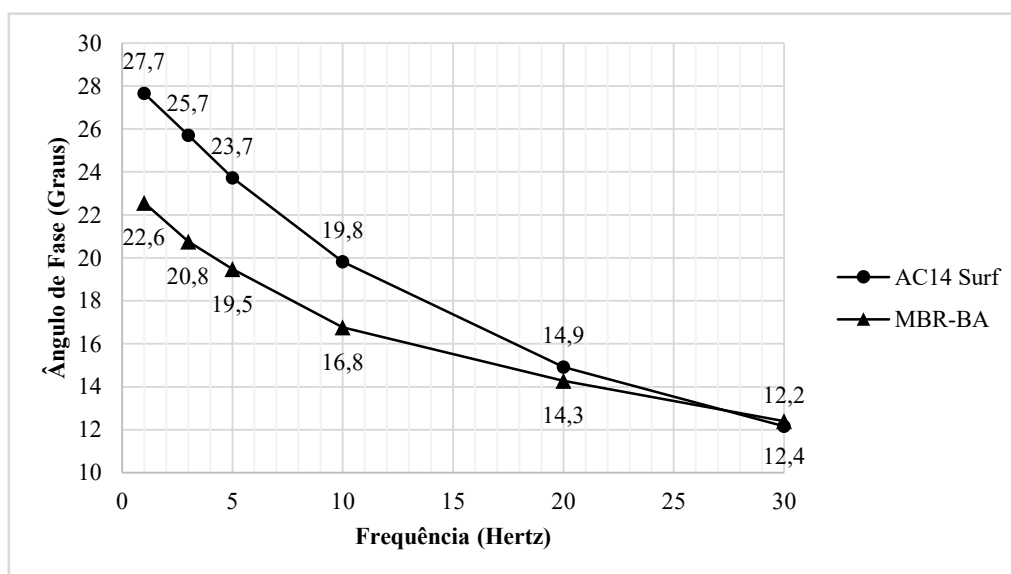


Figura 4.25 – Ângulo de Fase médio das vigas das misturas AC14 Surf e MBR-BA à temperatura de 20°C

Dos resultados da Figura 4.25, verifica-se que a mistura betuminosa MBR-BA, principalmente para as frequências mais baixas, apresenta valores de ângulos de fase mais baixos que a mistura betuminosa AC14 Surf. Tal evidência estará relacionada com o facto do material com incorporação de borracha, para a mesma temperatura de ensaio, apresentar um comportamento mais elástico, ou seja, apresentar valores de ângulo de fase mais próximos de zero. Tal comportamento mais elástico estará também relacionado com o facto de a mistura betuminosa MBR-BA, por possuir granulado de borracha, acomodar maior quantidade de ligante.

4.5.2.4 Caracterização da resistência à fadiga

Como referido anteriormente, os ensaios de resistência à fadiga foram realizados no equipamento de flexão em quatro pontos, de acordo com o procedimento da norma europeia

EN 12697-24. Estes ensaios foram conduzidos com extensão controlada e à temperatura de 20°C. O critério de rotura adotado foi o usual para este tipo de carregamento, ou seja, a diminuição do módulo de deformabilidade para 50% do seu valor inicial. O ensaio inicia com a determinação do módulo de deformabilidade inicial do provete, onde, para tal, o equipamento efetua inicialmente uma série de 100 ciclos.

No Quadro 4.31 apresentam-se, para os provetes da mistura MBR-BA, os valores obtidos no ensaio de caracterização do módulo de deformabilidade a 10Hz, conjuntamente com o módulo de deformabilidade inicial, determinado pelo equipamento no ensaio de fadiga, também a 10Hz.

Quadro 4.31 – Comparação do módulo de deformabilidade dos provetes da mistura MBR-BA

Viga	Módulo de Deformabilidade a 10Hz (MBR-BA)			
	Ensaio de Fadiga (20°C)		Ensaio de caracterização do módulo de deformabilidade (20°C)	
	Extensão (µm/m)	Módulo (MPa)	Extensão (µm/m)	Módulo (MPa)
V1.3	250	2457	50	3000
V2.2	250	2602	50	3231
V3.1	250	2398	50	3127
V3.4	250	2423	50	3117
V4.3	250	2455	50	2821
V1.2	350	2682	50	3431
V2.3	350	2216	50	3352
V3.3	350	2317	50	2897
V4.2	350	2605	50	3406
V4.4	350	2488	50	3140
V2.5	450	2157	50	2954
V3.2	450	2198	50	2927
V4.1	450	2369	50	3165
V4.5	450	2194	50	2801
V1.1	650	2144	50	2923
V1.5	650	1999	50	2996
V3.5	650	1671	50	2594
V1.4	700	2029	50	3088
V2.1	700	1921	50	2901
V2.4	700	2068	50	3110

No ensaio de caracterização do módulo de deformabilidade dos provetes da mistura betuminosa MBR-BA, o nível de extensão utilizado foi de 50 µm/m, enquanto que nos ensaios de fadiga foram usados níveis de 250 µm/m a 700 µm/m. Os valores dos módulos de deformabilidade são maiores no ensaio de caracterização do módulo de deformabilidade (em média são 34% superiores). Esta diferença percentual tende a aumentar para as maiores

extensões, ou seja, é tanto maior quanto maior a diferença entre as extensões do ensaio de caracterização do módulo de deformabilidade e do ensaio de fadiga.

Apresentam-se, no Quadro 4.32, para os provetes da mistura AC14 Surf, os valores obtidos no ensaio de caracterização do módulo de deformabilidade a 10Hz, conjuntamente com o módulo de deformabilidade inicial, determinado pelo equipamento no ensaio de fadiga, também a 10Hz.

Quadro 4.32 – Comparação do módulo de deformabilidade dos provetes da mistura AC14 Surf

Viga	Módulo de Deformabilidade a 10Hz (AC14 Surf)			
	Ensaio de Fadiga (20°C)		Ensaio de caracterização do módulo de deformabilidade (20°C)	
	Extensão (µm/m)	Módulo (MPa)	Extensão (µm/m)	Módulo (MPa)
V1.3	150	3958	50	4420
V1.5	150	3237	50	3690
V2.1	150	3382	50	4111
V2.3	150	4080	50	4722
V3.5	150	4013	50	4601
V4.3	150	4688	50	5575
V1.4	250	3461	50	4335
V2.2	250	3341	50	4637
V2.4	250	3349	50	4552
V3.1	250	3557	50	4379
V3.3	250	3957	50	4839
V4.4	250	3979	50	5350
V1.1	350	3425	50	4514
V1.2	350	3197	50	4172
V2.5	350	3350	50	4157
V3.2	350	3627	50	4948
V4.1	350	5161	50	5325
V4.5	350	4399	50	5492

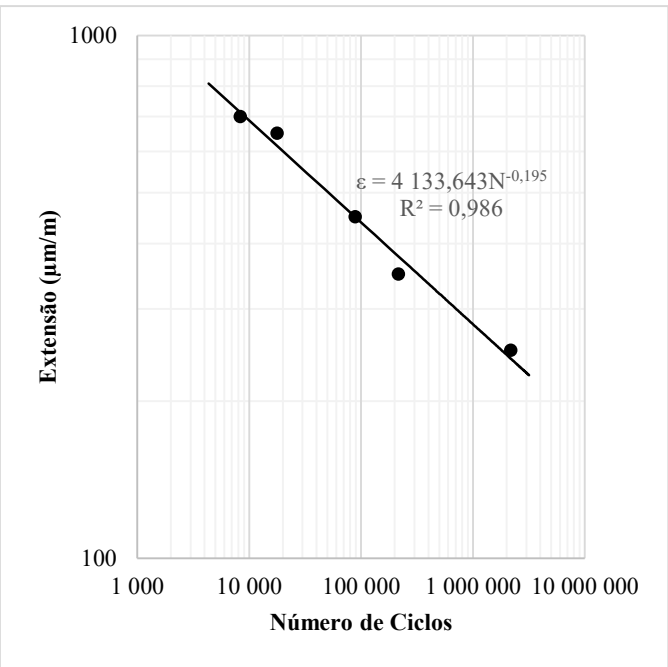
No ensaio de caracterização do módulo de deformabilidade dos provetes da mistura betuminosa AC14 Surf, o nível de extensão utilizado foi de 50 µm/m, enquanto que nos ensaios de fadiga foram usados níveis de 150 µm/m a 350 µm/m. Também nesta mistura betuminosa os valores dos módulos de deformabilidade são maiores no ensaio de caracterização do módulo de deformabilidade (em média são 23% superiores). Igualmente nesta mistura, esta diferença percentual tende a aumentar para as maiores extensões, sendo tanto maior quanto maior a diferença entre as extensões do ensaio de caracterização do módulo de deformabilidade e do ensaio de fadiga. Esta diferença percentual do módulo de deformabilidade não é tão acentuada como nos provetes da mistura MBR-BA devido ao

facto de, na mistura AC14, os níveis de extensão utilizados no ensaio de fadiga serem inferiores (150 $\mu\text{m/m}$ a 350 $\mu\text{m/m}$ ao invés de 250 $\mu\text{m/m}$ a 700 $\mu\text{m/m}$).

No Quadro 4.33 apresentam-se os resultados do ensaio de fadiga realizado aos provetes da mistura betuminosa MBR-BA.

Quadro 4.33 – Comportamento à fadiga das vigas da mistura MBR-BA (8% de betume)

Viga	Extensão ($\mu\text{m/m}$)	Número de ciclos a 10 Hertz	
		Viga	Média
V1.3	250	1430769	2179439
V2.2		3220755	
V3.1		1852648	
V3.4		142918	
V4.3		4250105	
V1.2	350	163090	216577
V2.3		250935	
V3.3		345415	
V4.2		83798	
V4.4		239649	
V2.5	450	94879	88821
V3.2		45066	
V4.1		90572	
V4.5		124766	
V1.1		650	
V1.5	3558		
V3.5	11897		
V1.4	700	12387	8349
V2.1		4098	
V2.4		8562	



$\epsilon_6 (10^6 \text{ ciclos}) = 279 \mu\text{m/m}$
 Inclinação da linha de fadiga = -5,13

Para a mistura MBR-BA, conforme a expressão (4.8), de acordo com a norma EN 12697-24, a lei de fadiga é a seguinte:

$$\ln(N) = 42,31 - 5,06 \times \ln(\epsilon) \quad (4.9)$$

Onde:

ϵ – Extensão de tração

N – Número de ciclos

De acordo com representação mais usual das leis de fadiga de misturas betuminosas (expressão (4.7)), a lei de fadiga da mistura MBR-BA é a seguinte:

$$\epsilon = 4133,694 \times N^{-0,195} \tag{4.10}$$

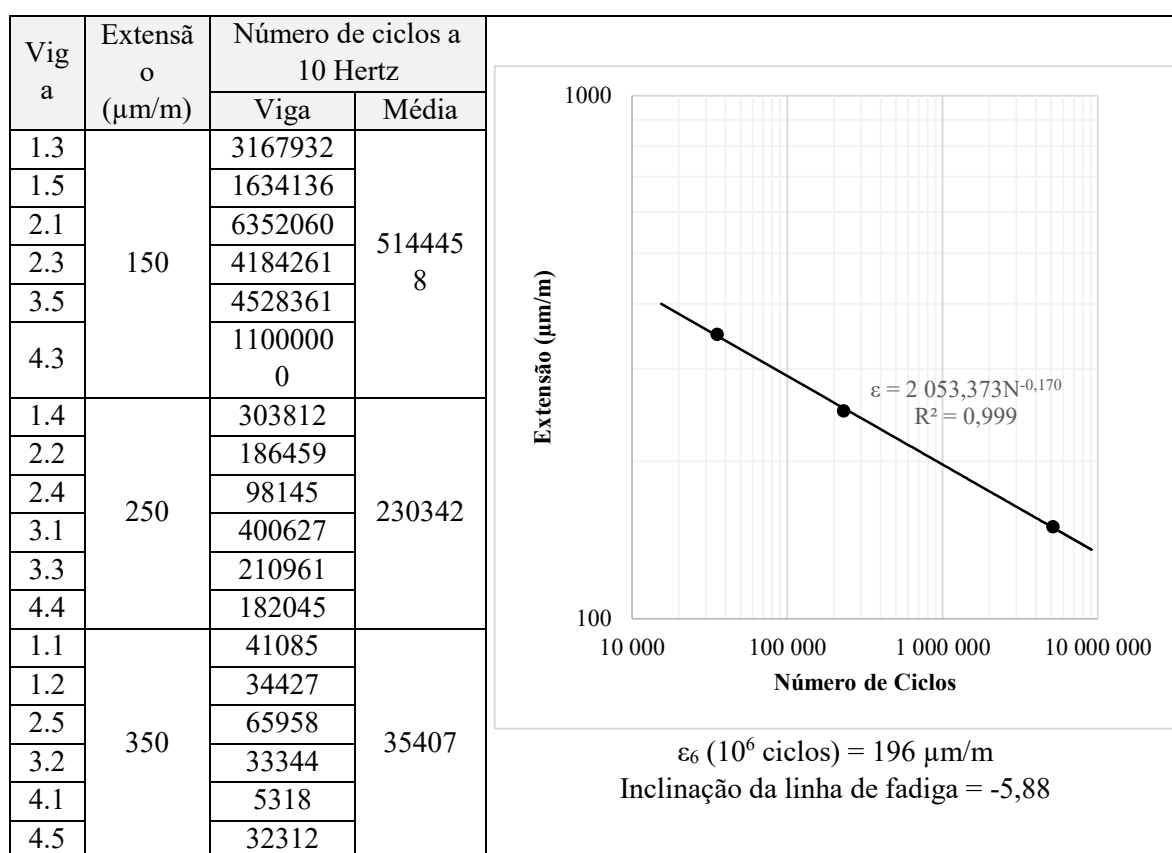
Onde:

ϵ – Extensão de tração

N – Número de ciclos

No Quadro 4.34 apresentam-se os resultados do ensaio de fadiga realizado aos provetes da mistura betuminosa AC14 Surf.

Quadro 4.34 – Comportamento à fadiga das vigas da mistura AC14 Surf (5% de betume)



Para a mistura AC14 Surf, também de acordo com a norma EN 12697-24, a lei de fadiga é a seguinte:

$$\ln(N) = 44,95 - 5,89 \times \ln(\varepsilon) \quad (4.11)$$

Também para esta mistura, de acordo com a representação mais usual das leis de fadiga de misturas betuminosas, a lei de fadiga é a seguinte:

$$\varepsilon = 2053,373 \times N^{-0,170} \quad (4.12)$$

Apresentam-se, na Figura 4.26, as linhas de fadiga das misturas MBR-BA e AC14 Surf.

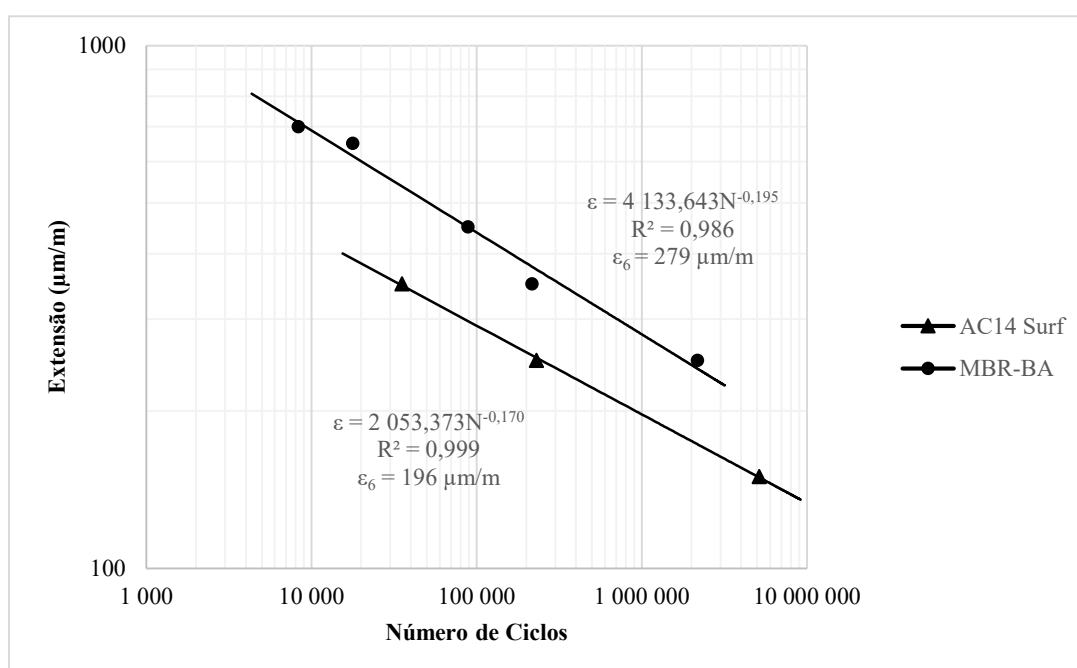


Figura 4.26 – Comportamento à fadiga das vigas das misturas AC14 Surf e MBR-BA

Complementarmente à lei de fadiga, a norma EN 12697-24 estipula que deverá ser apresentado o valor de ε_6 e ainda a inclinação da linha de fadiga. O valor de ε_6 representa o nível de extensão para o qual o número de ciclos necessário para se atingir a rotura é 1 000 000. Estes parâmetros, presentes nos quadros anteriores para cada tipo de mistura betuminosa, resumem-se agora no Quadro 4.35.

Quadro 4.35 – Resultados complementares da linha de fadiga

Mistura Betuminosa	ϵ_6 ($\mu\text{m/m}$)	Inclinação da linha de fadiga
MBR-BA	279	-5,13
AC14 Surf	196	-5,88

Verifica-se, do Quadro 4.35, que o valor ϵ_6 da mistura MBR-BA é cerca de 1,5 vezes superior ao valor ϵ_6 da mistura AC14-Surf. Tal significa que a mistura betuminosa com borracha adicionada por via seca, em relação à mistura betuminosa de referência, para o mesmo número de ciclos de carga, suporta um nível de extensão bastante superior. De forma análoga, para o mesmo nível de extensão, a mistura MBR-BA suporta um número de ciclos de carga, também, bastante superior (pelo menos 6 vezes mais).

De forma resumida pode dizer-se que a mistura MBR-BA apresenta melhor comportamento à fadiga que a mistura AC14 Surf. Este é um comportamento esperado já que para a temperatura de 20°C uma maior percentagem de ligante induz um melhor comportamento à fadiga quando analisado da forma descrita.

4.6 Desempenho Estrutural na Presença de Fendas

Neste subcapítulo, com o intuito de perceber como se comportam as misturas betuminosas com borracha adicionada por via seca face às misturas betuminosas sem borracha, perante condições de serviço exigentes, nomeadamente a presença de fendilhamento nas camadas que as suportam, é apresentada uma análise do comportamento à fadiga e à deformação permanente, em provetes com fendilhamento induzido.

4.6.1 Fadiga com Fenda Induzida

O fendilhamento prematuro dos reforços dos pavimentos é normalmente originado pela propagação de fendas existentes nas camadas fendilhadas do pavimento antigo para a camada de reforço. Tal acontece porque a colocação de camadas betuminosas de reforço sobre camadas betuminosas fendilhadas origina um funcionamento estrutural do pavimento diferente daquele verificado em pavimentos novos (Pais et al. 2000).

As camadas de reforço dum pavimento, quando aplicadas sobre um pavimento fendilhado, ficam sujeitas a zonas de rigidez estrutural muito variável. Tal acontece porque os locais

onde se situam as fendas apresentam uma rigidez muito reduzida em comparação com os locais que não apresentam fendas.

A secção dum pavimento que contem fendas, em comparação ao resto do pavimento, apresenta uma reduzida resistência estrutural. Quando esta secção do pavimento é solicitada à flexão ou ao corte, as camadas de reforço são mobilizadas para resistir aos esforços resultantes. Neste sentido, os pavimentos sofrerão ruína prematura se estes esforços não forem considerados nos métodos de dimensionamento de reforços de pavimentos (Pais et al. 2000).

No sentido de perceber como se comportam as misturas betuminosas, estudadas neste trabalho, à presença de fendilhamento no pavimento, procedeu-se à realização de um ensaio de carregamento cíclico idêntico ao utilizado na verificação à fadiga. O ensaio foi em tudo semelhante ao ensaio de fadiga, com a exceção dos provetes ensaiados apresentarem uma fenda induzida (Figura 4.27). De forma a perceber como evoluía o fendilhamento nos provetes, optou-se por um critério de paragem do ensaio diferente, ou seja, o ensaio terminou quando o provete apresentou um módulo de deformabilidade de 20% em relação ao módulo de deformabilidade inicial.



Figura 4.27 – Proвете betuminoso com fenda induzida

A fenda induzida nos provetes betuminosos foi conseguida com o recurso a uma serra circular que efetuou um corte na zona central da base do provete (Figura 4.27). A espessura do corte rondou os 5 milímetros.

A fim de saber qual a profundidade de corte a adotar, efetuou-se uma simulação, no programa de elementos finitos SAP2000, do comportamento dos provetes betuminosos em condições de carregamento similares às do ensaio de fadiga. Considerou-se que as propriedades do provete betuminoso utilizado na modelação eram iguais às obtidas num dos ensaios de fadiga a uma viga da mistura MBR-BA. Essa viga quando submetida ao ensaio de fadiga na frequência de 10Hz, com uma extensão de 650 $\mu\text{m}/\text{m}$, apresentou um módulo de deformabilidade de 1938 MPa. A força aplicada na viga para que ela atingisse a extensão

de $650 \mu\text{m/m}$ foi de 480 N em cada um dos dois atuadores de carga. Este carregamento originou uma máxima tensão de tração na viga de $1,173 \text{ MPa}$ e uma deformação vertical de $0,344 \text{ mm}$. No modelo foi considerado que o material possuía um comportamento elástico linear. As profundidades de corte consideradas foram dois, quatro, seis, oito, dez e doze milímetros. As condições de apoio e carregamento do modelo de elementos finitos apresentam-se na Figura 4.28.

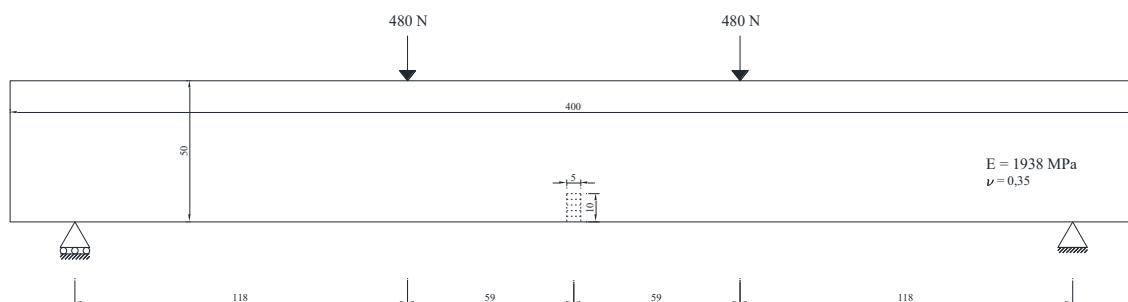
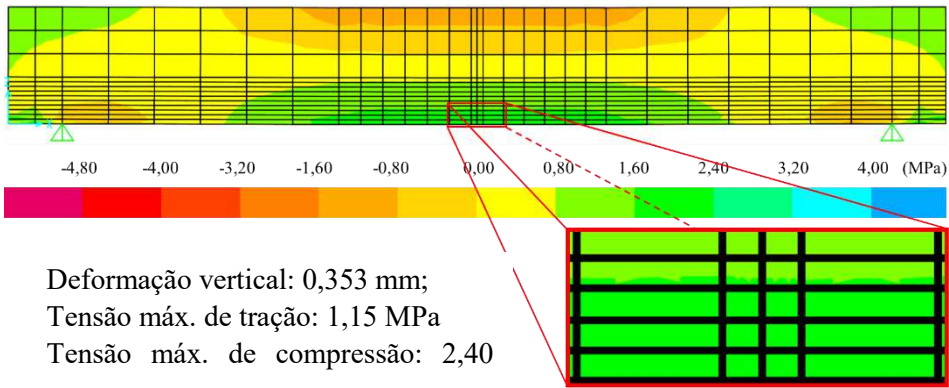
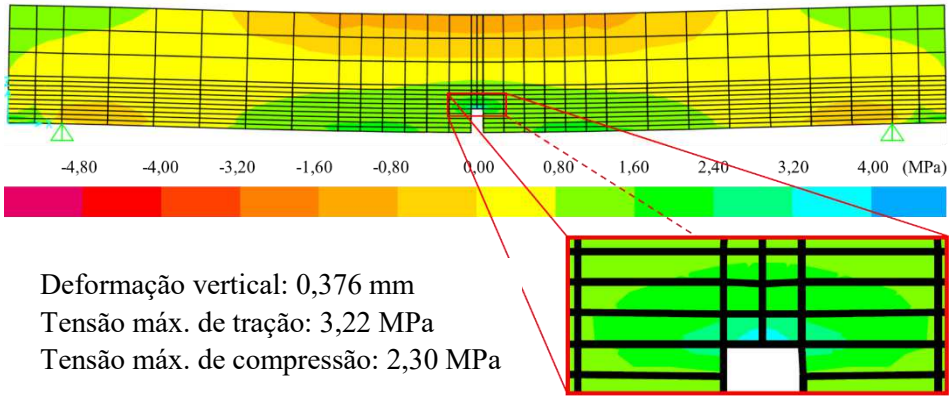


Figura 4.28 – Condições de carregamento e de apoio do modelo de elementos finitos

Apresenta-se, no Quadro 4.36, a distribuição de tensões geradas na viga considerada no modelo de elementos finitos, sem fenda e com fenda de 10 mm de profundidade. Nas imagens do Quadro 4.36 as tensões de compressão aumentam de amarelo para magenta enquanto que as tensões de tração aumentam de amarelo para azul. Verifica-se que na viga sem fenda, as tensões máximas de tração se distribuem uniformemente pela zona central da base da mesma. Tal acontece porque as condições de carregamento geram um momento fletor constante na zona central da viga. Quando a viga passa a ter uma fenda o mesmo já não acontece, as máximas tensões de tração tendem a aumentar e a acumular-se na zona envolvente da fenda. Quanto às máximas tensões de compressão, como seria de esperar, estas surgem nas zonas envolventes aos pontos de aplicação das cargas e aos apoios da viga (Figura 4.28 e Quadro 4.36).

Em termos percentuais, de acordo com o Quadro 4.36, a presença de uma fenda de 10 mm na viga, representa uma variação de $6,5\%$ para a deformação vertical de $180,0\%$ para a máxima tensão de tração e de $4,2\%$ para a máxima tensão de compressão. Como seria de esperar, com a presença da fenda induzida, a maior variação verificou-se nos esforços de tração, esforços que condicionam a resposta das camadas betuminosas dos pavimentos rodoviários ao aparecimento e propagação de fendas.

Quadro 4.36 – Output do modelo de elementos finitos

Profundidade da fenda (mm)	Deformação vertical e tensões máximas de tração e de compressão na viga
0	 <p>Deformação vertical: 0,353 mm; Tensão máx. de tração: 1,15 MPa Tensão máx. de compressão: 2,40</p>
10	 <p>Deformação vertical: 0,376 mm Tensão máx. de tração: 3,22 MPa Tensão máx. de compressão: 2,30 MPa</p>

Apresenta-se, na Figura 4.29, a máxima tensão de tração na base do provete betuminoso para todas as profundidades de fenda consideradas no modelo de elementos finitos. Desta análise, como seria de esperar, verifica-se que a tensão de tração aumenta com o aumento do comprimento da fenda induzida. Contudo, este aumento é mais acelerado até aos 6 mm, sendo menos evidente a partir dos 8 mm. Adotou-se, assim, que a fenda induzida a considerar no ensaio teria uma profundidade de 10 mm.

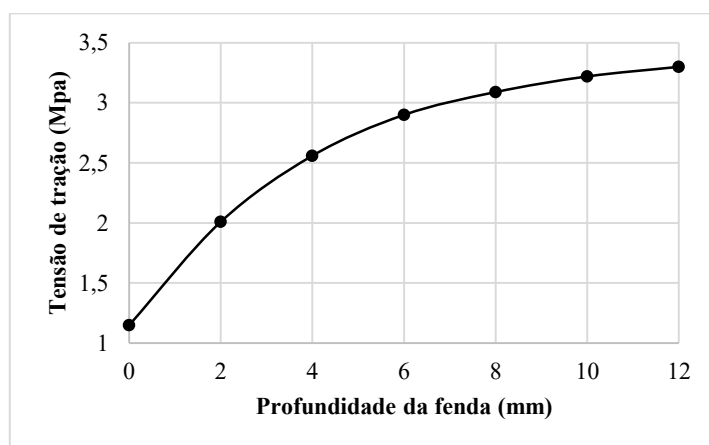


Figura 4.29 – Máxima tensão de tração na base do provete do modelo de elementos finitos

No Quadro 4.37 e no Quadro 4.38, apresentam-se os resultados da caracterização geométrica das vigas das misturas MBR-BA e AC14 Surf, respectivamente, para as percentagens ótimas em betume. Cada grupo de vigas provém de uma única laje.

Quadro 4.37 – Caracterização geométrica das vigas com fenda induzida da mistura MBR-BA

MBR-BA (8,0% Betume)										
Viga	Altura, h (mm)					Largura, l (mm)				
	h ₁	h ₂	h ₃	h ₄	média	l ₁	l ₂	l ₃	l ₄	média
1	53,26	52,31	52,92	52,83	52,83	50,78	50,75	50,83	51,07	50,86
2	53,63	52,86	52,99	52,80	53,07	50,93	50,65	50,68	51,10	50,84
3	54,04	52,80	52,98	53,10	53,23	51,04	51,11	51,61	51,45	51,30
4	52,89	53,12	52,95	53,82	53,20	50,79	50,78	51,08	50,49	50,79
5	53,43	52,82	53,00	53,01	53,07	50,71	50,49	51,37	51,34	50,98

Quadro 4.38 – Caracterização geométrica das vigas com fenda induzida da mistura AC14 Surf

AC14 Surf (5,0% Betume)										
Viga	Altura, h (mm)					Largura, l (mm)				
	h ₁	h ₂	h ₃	h ₄	média	l ₁	l ₂	l ₃	l ₄	média
1	52,91	52,48	52,66	52,45	52,63	51,10	50,54	50,39	49,77	50,45
2	53,09	52,39	53,00	52,63	52,78	50,26	50,36	49,78	50,11	50,13
3	51,91	51,82	51,99	52,86	52,15	49,57	50,41	50,54	50,95	50,37
4	53,43	52,21	52,65	52,90	52,80	49,85	49,99	50,09	50,47	50,10
5	53,21	52,06	52,31	52,33	52,48	50,19	50,29	50,98	50,17	50,41

No Quadro 4.39, apresentam-se os resultados da média, do desvio padrão e do coeficiente de variação da baridade, da porosidade e do volume de vazios no esqueleto do agregado, VMA, das vigas das misturas MBR-BA e AC14 Surf, também para a percentagem ótima em betume.

Quadro 4.39 – Média, desvio padrão e coeficiente de variação da baridade, da porosidade e do VMA das vigas com fenda induzida

Vigas		Baridade (kg/m ³)	Porosidade (%)	VMA (%)
MBR-BA (8,0% Betume)				
1 a 5	Média	2153,92	5,73	22,46
	Desvio Padrão	12,77	0,56	0,46
	Coeficiente de Variação	0,59	9,76	2,05
Baridade máxima teórica = 2284,85 (kg/m ³); Temperatura água = 23,5°C				
AC14 Surf (5,0% Betume)				
1 a 5	Média	2272,90	6,02	17,06
	Desvio Padrão	10,52	0,44	0,38
	Coeficiente de Variação	0,46	7,22	2,25
Baridade máxima teórica = 2418,58 (kg/m ³); Temperatura água = 23,5°C				

Apresentam-se, na Figura 4.30, à temperatura de 20°C, os valores médios e os percentis de 5% e de 95% dos módulos de deformabilidade das vigas das misturas AC14 Surf e MBR-BA.

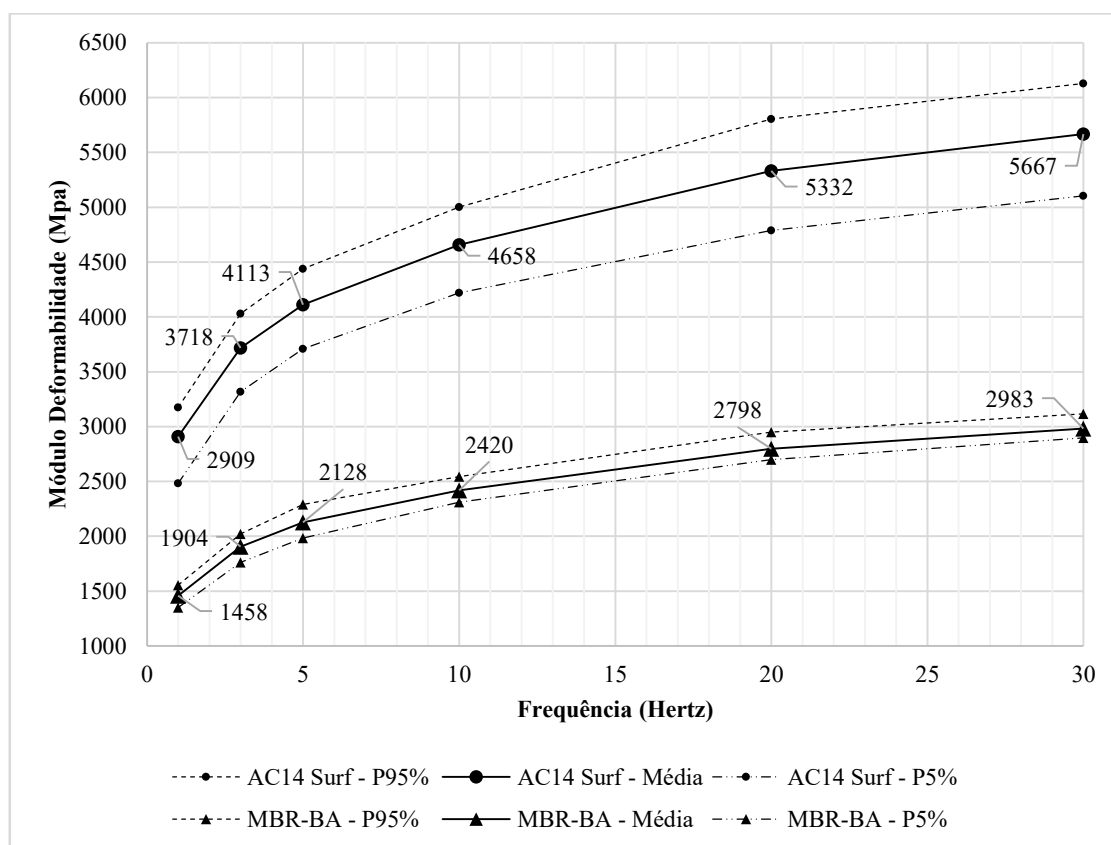


Figura 4.30– Módulo de deformabilidade das vigas com fenda induzida, à temperatura de 20°C

Na Figura 4.31, apresenta-se, para a temperatura de ensaio de 20°C, o ângulo de fase médio das vigas das misturas AC14 Surf e MBR-BA.

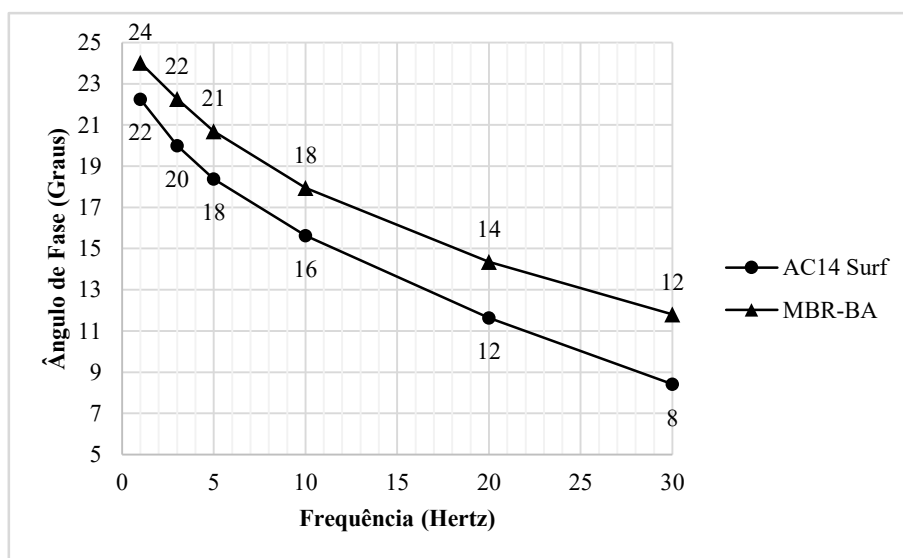


Figura 4.31 – Ângulo de fase médio das vigas com fenda induzida, à temperatura de 20°C

No ensaio de fadiga realizado às misturas betuminosas MBR-BA e AC14 Surf consideraram-se distintas extensões, desde os 150 $\mu\text{m}/\text{m}$ na mistura AC14 Surf até aos 700 $\mu\text{m}/\text{m}$ na mistura MBR-BA. De forma a não repetir todas as frequências neste ensaio das vigas com a fenda induzida, considerou-se apenas a extensão de 250 $\mu\text{m}/\text{m}$. Esta extensão foi comum a ambas as misturas no ensaio de fadiga sem fenda induzida. Uma vez que de cada laje betuminosa se conseguem obter apenas 5 vigas, este ensaio foi realizado com esse mesmo número de provetes por mistura betuminosa.

Na Figura 4.32 é apresentado o andamento dos ensaios de fadiga dos provetes com fenda induzida das misturas MBR-BA e AC14 Surf. Estabeleceu-se, neste caso, como critério de paragem do ensaio o ciclo em que o provete apresentou um módulo de deformabilidade de 20% em relação ao módulo de deformabilidade inicial. Esta consideração teve por base o facto ser mais fácil, nesta percentagem, identificar o aparecimento de fendilhamento na viga. Também, para facilitar essa identificação, as vigas foram pintadas lateralmente com uma tinta azul clara (Figura 4.33).

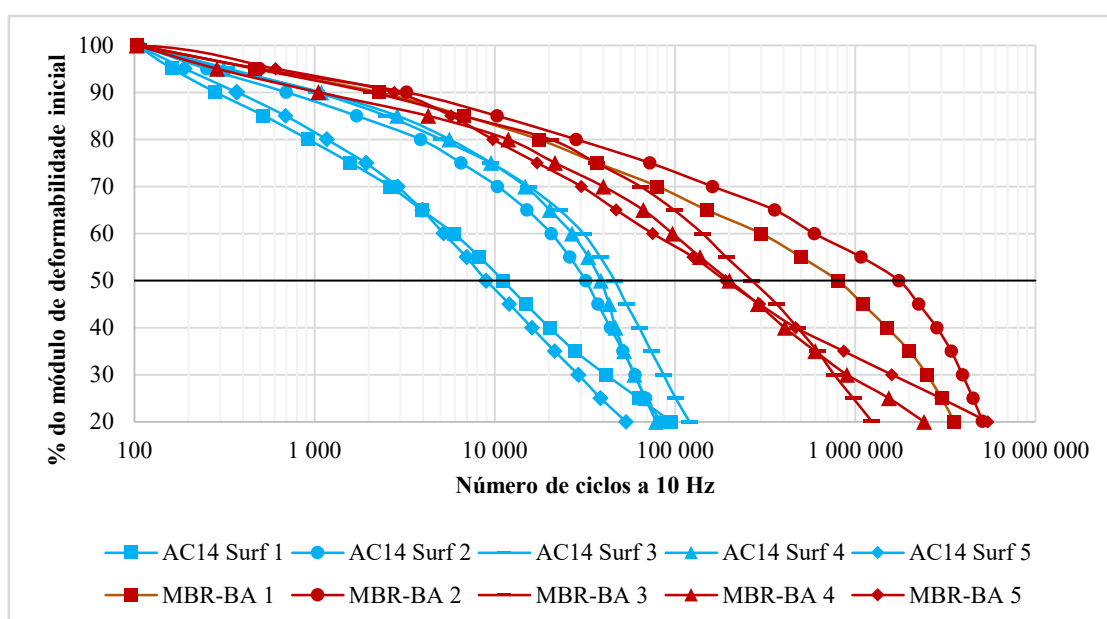


Figura 4.32 – Andamento do ensaio de fadiga aos provetes com fenda induzida.



Figura 4.33 – Pintura da viga

Apresenta-se, na Figura 4.34, o número de ciclos que cada mistura suporta, na extensão de 250 $\mu\text{m}/\text{m}$, para o critério de paragem de 50% e 20% do módulo de deformabilidade inicial. São ainda apresentados, a vermelho, dois pontos que representam número de ciclos que cada mistura suportou no ensaio de fadiga sem fenda induzida, também, na extensão de 250 $\mu\text{m}/\text{m}$.

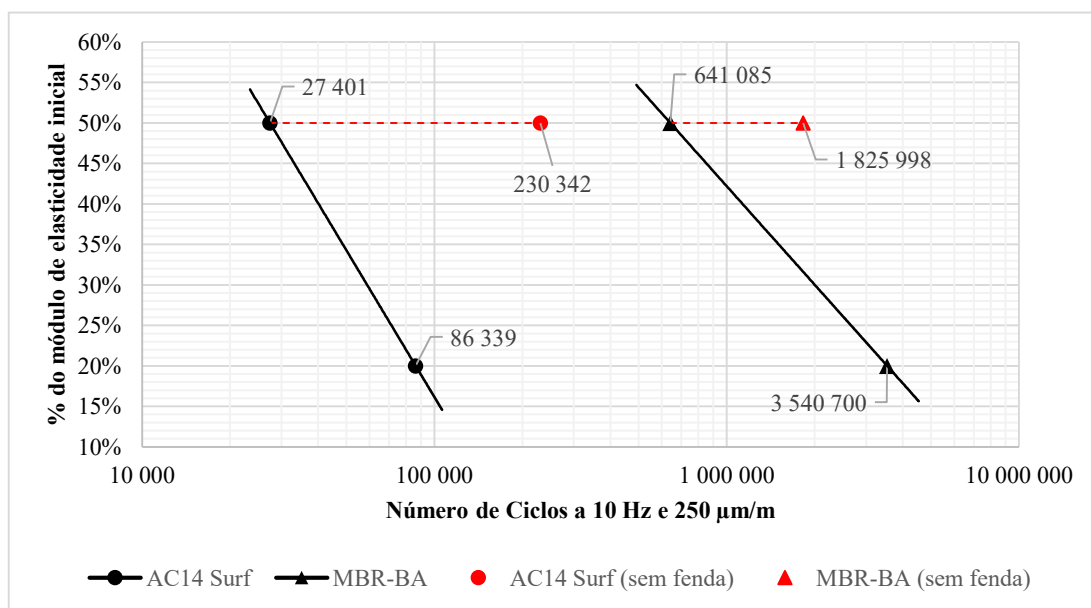


Figura 4.34 – Número de ciclos para diferentes critérios de paragem (50% e 20%)

Da análise da Figura 4.34, no que respeita ao comportamento à fadiga das misturas betuminosas MBR-BA e AC14 Surf, podem obter-se várias inferências. Para o critério de paragem de 50% do módulo de deformabilidade inicial, a mistura MBR-BA, em relação à AC14, suporta um número de ciclos bastante superior (mais de 20 vezes superior). Quando

o critério de paragem é 20% do módulo de deformabilidade inicial, esta diferença é ainda maior, cerca de 40 vezes superior. Ou seja, quando se permite uma maior incidência de propagação da fenda (passar do critério de paragem de 50% para 20% tem esse efeito) nas mesmas condições de ensaio a MBR-BA permite um acréscimo de cerca de 100000 repetições por cada decréscimo de 1% de módulo de deformabilidade contra 2000 repetições da AC14surf nas mesmas condições. Tal indica, sem margem para dúvida e para as condições de ensaio descritas, que a mistura betuminosa com borracha adicionada por via seca, MBR-BA, possui uma muito maior capacidade para absorver os acréscimos de tensão gerados na zona envolvente à fenda induzida nos provetes, pelo que é legítimo admitir que terá uma muito maior capacidade para resistir ao atravessamento por fendilhamento vindo de camadas inferiores, vulgo propagação de fendas.

Também, da Figura 4.34, é possível observar outra particularidade. Quando comparado o número de ciclos que cada mistura suporta em provetes com fenda induzida e em provetes sem fenda induzida, verifica-se uma diferença acentuada entre a mistura MBR-BA e a mistura AC14 Surf. Como seria de esperar, ambas as misturas, em provetes com fenda induzida, suportam um número de ciclos inferior às misturas em provetes sem fenda induzida, no entanto esta diferença é muito mais acentuada na mistura betuminosa AC14 Surf (cerca de 8 vezes inferior) do que na mistura betuminosa MBR-BA (cerca de 3 vezes inferior). Desta forma, também por aqui, se verifica que a mistura betuminosa com borracha adicionada por via seca, MBR-BA, tem uma muito maior capacidade para resistir à propagação de fendas, levando em conta as condições de ensaio descritas.

Na Figura 4.35 apresentam-se algumas fotografias da zona central das vigas, da mistura betuminosa MBR-BA, que foram submetidas ao ensaio de fadiga com fenda induzida. Foi apenas nesta zona que se observou algum fendilhamento no final do ensaio. As áreas que exibiram fendilhamento visível estão assinaladas a vermelho.

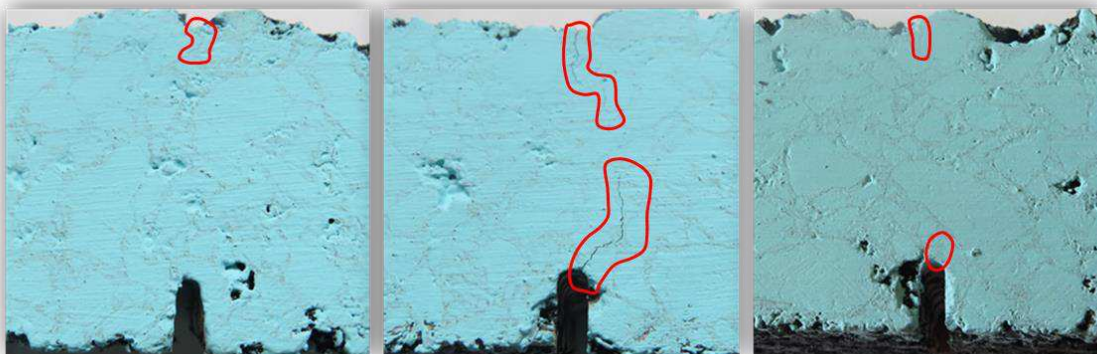


Figura 4.35 – Fotografias da zona fendilhada de alguns provetes MBR-BA

Na Figura 4.36 apresentam-se algumas fotografias da zona central das vigas, da mistura betuminosa AC14 Surf, que foram submetidas ao ensaio de fadiga com fenda induzida. Foi, também, apenas nesta zona que se observou algum fendilhamento no final do ensaio. Também aqui as áreas que exibiram fendilhamento visível estão assinaladas a vermelho.

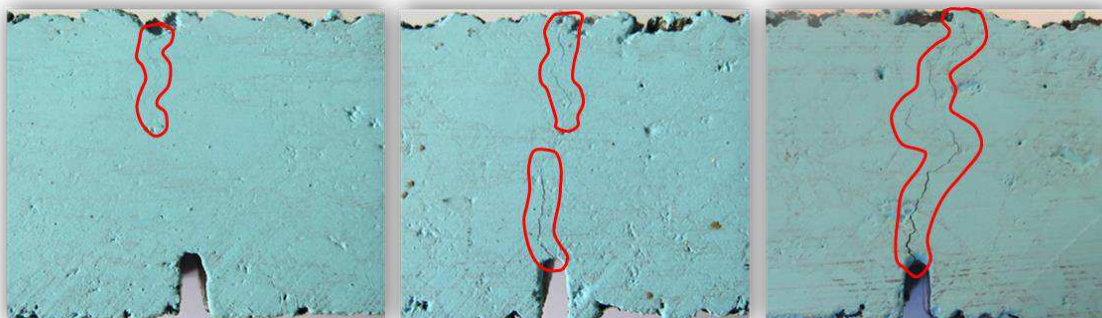


Figura 4.36 – Fotografias da zona fendilhada de alguns provetes AC14 Surf

Como se pode observar na Figura 4.35 e na Figura 4.36, o aparecimento de fendilhamento, nos provetes betuminosos sujeitos ao ensaio de fadiga com fenda induzida, foi mais evidente na mistura betuminosa de referência.

4.6.2 Deformação Permanente com Fenda Induzida

De forma a perceber melhor como reagem as misturas betuminosas à propagação de fendas, realizou-se uma adaptação ao ensaio de deformação permanente com recurso ao *Wheel*

Tracking. Aqui foi também utilizado o dispositivo de pequeno porte com os provetes acondicionados ao ar, ou seja, procedimento B da norma EN 12697-22 (CEN 2003a).

A adaptação que se efetuou ao ensaio seguiu, essencialmente, o seguinte (Figura 4.37):

- Em vez de utilizar uma única laje por ensaio, utilizaram-se duas lajes coladas, sendo que a laje inferior possuía uma fenda longitudinal central em toda a sua espessura;
- O conjunto das duas lajes passou a estar apoiado sobre duas membranas de borracha neoprene com a espessura de 8 mm cada;
- As lajes, durante o ensaio, deixaram de estar confinadas por um molde metálico, estando apenas amparadas por dois apoios laterais;
- A temperatura do ensaio foi de 20°C e 40°C;
- Por limitações de espaço disponível no equipamento de ensaio e no molde de compactação, a espessura de cada laje foi de 45 mm, ou seja, 45 mm + 45 mm por conjunto de duas lajes.

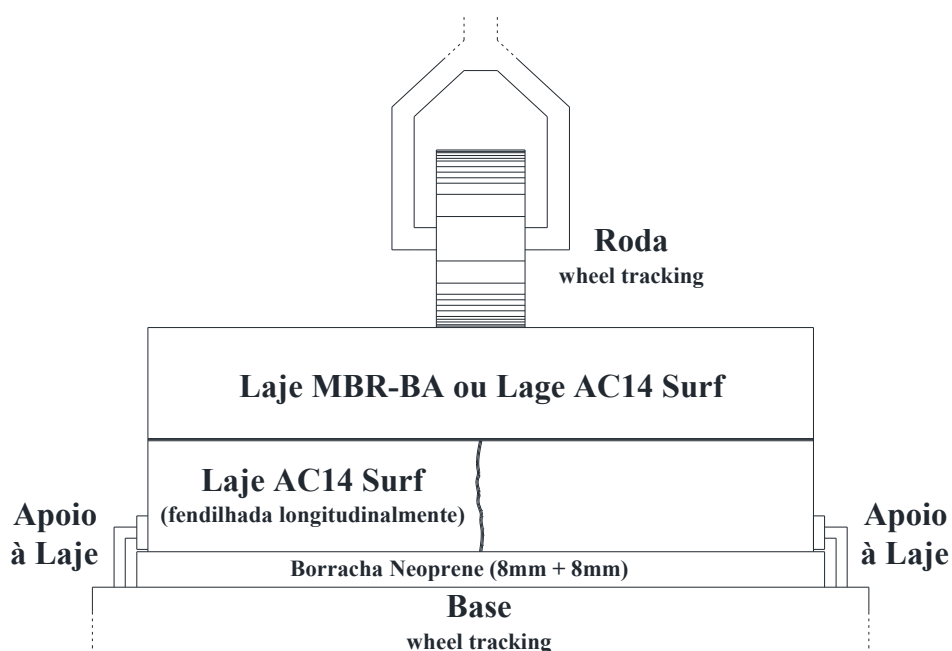


Figura 4.37 – Disposição das lajes no ensaio de deformação permanente com fenda induzida

A utilização de duas lajes coladas, com uma delas fendilhada, teve como principal objetivo verificar se, com a realização do ensaio, haveria propagação da fenda induzida na laje inferior à laje superior. Para tal realizaram-se duas disposições distintas das lajes. Uma disposição recorreu à utilização da mistura AC14 Surf na laje inferior (fendilhada) e da

mistura MBR-BA na laje superior (não fendilhada). Outra disposição recorreu à utilização da mistura AC14 Surf tanto na laje inferior (fendilhada) como na laje superior (não fendilhada).

A compactação das lajes, neste caso, foi mais difícil, pois foi necessário compactar duas lajes sobrepostas, sendo que uma delas estaria com uma fenda longitudinal induzida.

A primeira etapa passou por compactar a laje fendilhada. A fissura foi induzida na laje recorrendo à colocação de uma folha de alumínio, disposta longitudinalmente, a meio do molde onde a mesma laje seria compactada. Após a colocação da folha de alumínio colocou-se a mistura betuminosa no molde, disposta em igual quantidade em cada metade do mesmo. Seguiu-se a compactação da laje inferior, terminando assim a primeira etapa.

Estando a primeira etapa concluída, avançou-se para a compactação da laje superior. Começou-se por espalhar uma rega de colagem sobre a laje inferior, colocou-se a mistura betuminosa no molde e procedeu-se à compactação da laje superior. Finda a compactação, procedeu-se à desmoldagem do grupo das duas lajes, ficando-se com um conjunto composto por uma laje inferior fendilhada e uma laje superior não fendilhada (Figura 4.38).



Figura 4.38 – Disposição das lajes coladas

Como se verifica na Figura 4.37, de forma a permitir alguma deformação vertical no conjunto das lajes, foram introduzidas duas membranas de borracha neoprene, com a espessura de 8 mm cada, na base metálica do equipamento *Wheel Tracking*. Desta forma o

conjunto das lajes, em vez de assentar diretamente na base rígida do *Wheel Tracking*, passou a assentar nas membranas de borracha.

Apresentam-se, no Quadro 4.40, as principais propriedades da borracha de Neoprene utilizada.

Quadro 4.40 - Propriedades da borracha de Neoprene

Folha de Borracha de Neoprene	
Densidade, g/cm ³	1,5
Dureza, Shore A	65 ± 5
Resistência à Tração, MPa	3
Alongamento, %	240

A determinação da espessura de borracha utilizada foi determinada com a ajuda da simulação do comportamento, perante a carga aplicada pela roda do equipamento *Wheel Tracking*, do conjunto das lajes no programa de elementos finitos SAP2000. Verificou-se, numericamente, qual seria a diferença entre as lajes estarem apoiadas numa fundação, constituída por solo de fundação com um módulo de deformabilidade de 100 MPa e por uma camada agregado britado de granulometria extensa, ABGE, com um módulo de deformabilidade de 200 MPa (Figura 4.39), e em duas membranas de borracha de neoprene, com um módulo de compressibilidade, E_b , de 2000MPa, com uma espessura total de 16 mm (Figura 4.40).

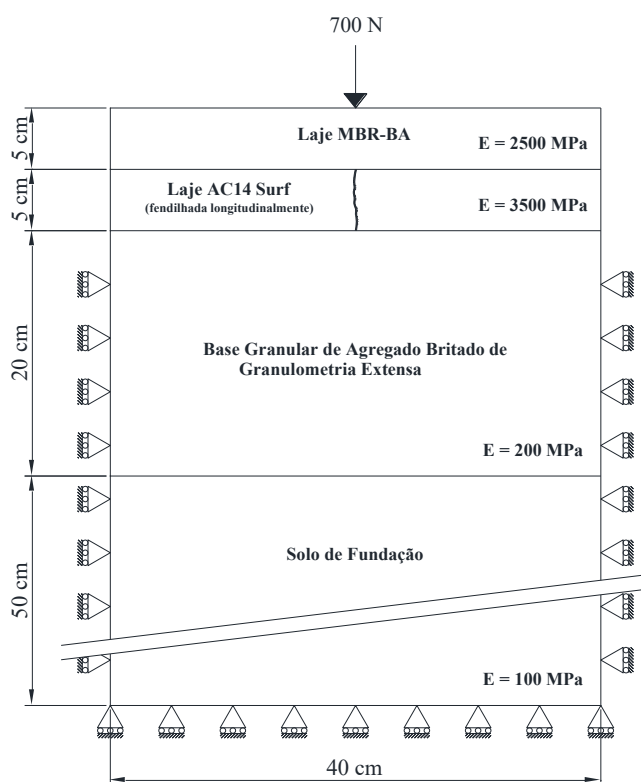


Figura 4.39 – Suporte das lajes modeladas (solo fundação e ABGE)

Dos resultados obtidos da modelação (Figura 4.41) verificou-se que a máxima tensão de tração, nas lajes apoiada pelas membranas de borracha não foi muito diferente da máxima tensão de tração das lajes apoiadas pelo conjunto solo de fundação e ABGE. Neste sentido, e uma vez que não havia espaço disponível para a colocação de mais uma membrana de borracha, considerou-se que a colocação de duas membranas de borracha simulava razoavelmente bem as condições de fundação de um pavimento betuminoso.

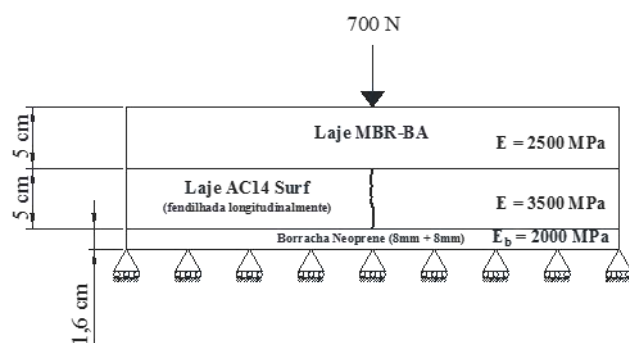


Figura 4.40 – Suporte das lajes modeladas (membranas neoprene)

Apoio das Lajes: Solo de Fundação e ABGE

Apoio das Lajes: Borracha Neoprene

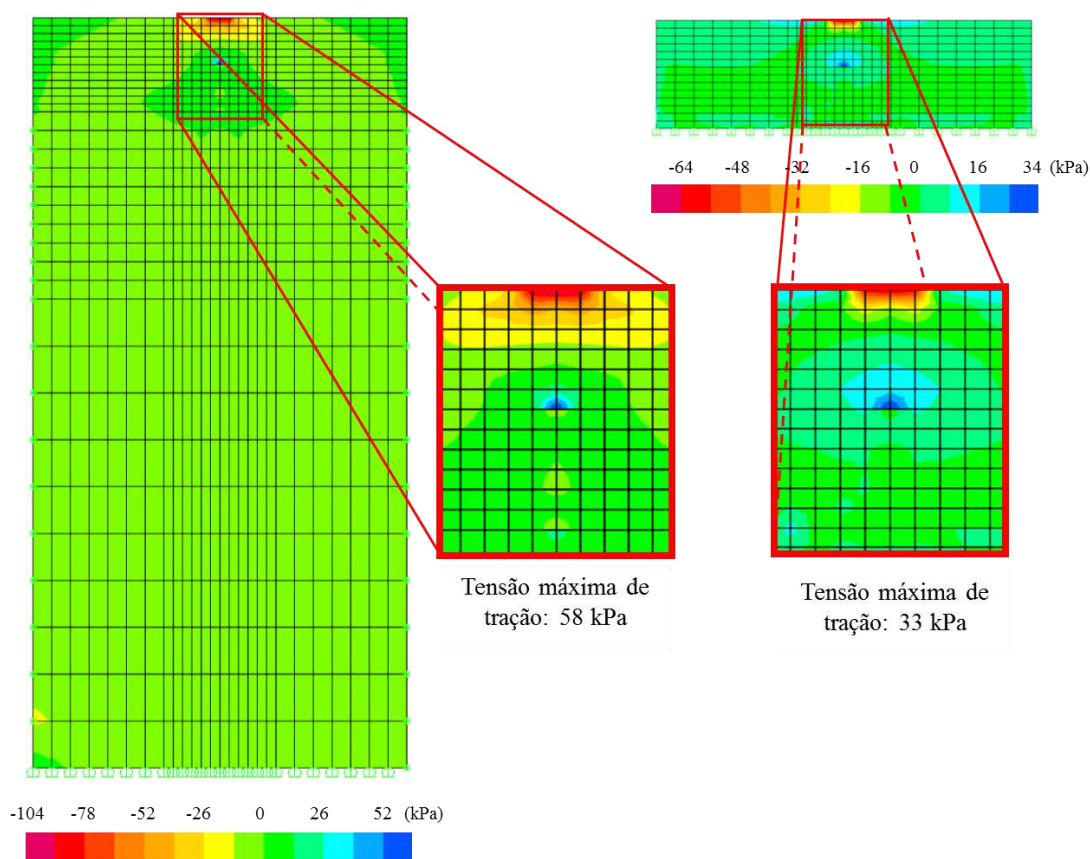


Figura 4.41 – Resultados da modelação dos diferentes suportes das lajes betuminosas

Para facilitar a deformação horizontal das lajes, estas deixaram de estar confinadas por um molde metálico, estando apenas amparadas por dois apoios laterais. As temperaturas consideradas foram 20°C e 40°C. Não se considerou a temperatura de 60°C pois a essa temperatura, uma vez que as lajes não estavam confinadas pelo molde metálico, a roda do

Wheel Tracking empurrava o material das lajes provocando o fim antecipado do ensaio por excesso de deformação (Figura 4.42). Tal efeito pode ser explicado pelo facto de o betume utilizado (betume convencional de penetração nominal 35/50) possuir uma temperatura de amolecimento entre 50°C e 58°C, inferior a 60°C portanto.



Figura 4.42 – Deformação excessiva nas lajes a 60°C

Apresentam-se, no Quadro 4.41, os quatro conjuntos de lajes ensaiados. Dois deles à temperatura de 20°C e outros dois à temperatura de 40°C. Ambas as misturas betuminosas, também aqui, foram formuladas com as percentagens ótimas de betume, ou seja, 5,0% para a mistura AC14 Surf e 8,0% para a mistura MBR-BA.

Quadro 4.41 – Disposição dos conjuntos de lajes ensaiados

Laje Inferior	Laje Superior	Temperatura (°C)	Designação do Conjunto
AC14 Surf	MBR-BA	20	MBR-BA 20
AC14 Surf	MBR-BA	40	MBR-BA 40
AC14 Surf	AC14 Surf	20	AC14 Surf 20
AC14 Surf	AC14 Surf	40	AC14 Surf 40

Apresenta-se, no Quadro 4.42, a espessura média e a baridade geométrica dos diferentes grupos de lajes. Uma vez que as lajes foram compactadas em molde metálico indeformável, as dimensões, em planta, das lajes mantiveram-se invariáveis, ou seja, com 400x300mm².

Quadro 4.42 – Caracterização geométrica dos conjuntos de lajes ensaiados

Laje	Temp. Ensaio (°C)	Espessura média dos lados (mm)				Esp. Média (mm)	Esp. Nom. (mm)	Desvio (%)	Massa (g)	Baridade Geom. (g/cm ³)
		e ₁	e ₂	e ₃	e ₄					
AC14 Surf + MBR-BA	20	90,78	92,12	91,33	91,29	91,38	90,00	1,53%	24425	2,227
	40	90,67	91,89	91,44	91,32	91,33	90,00	1,48%	24385	2,225
AC14 Surf + AC14 Surf	20	92,65	92,64	92,04	93,40	92,68	90,00	2,98%	24955	2,244
	40	92,35	92,72	91,97	93,10	92,54	90,00	2,82%	24936	2,246

Na Figura 4.43 está representada, para a temperatura de 20°C, a evolução da deformação do grupo de lajes AC14 Surf 20 e MBR-BA 20 ao longo do ensaio *Wheel Tracking*.

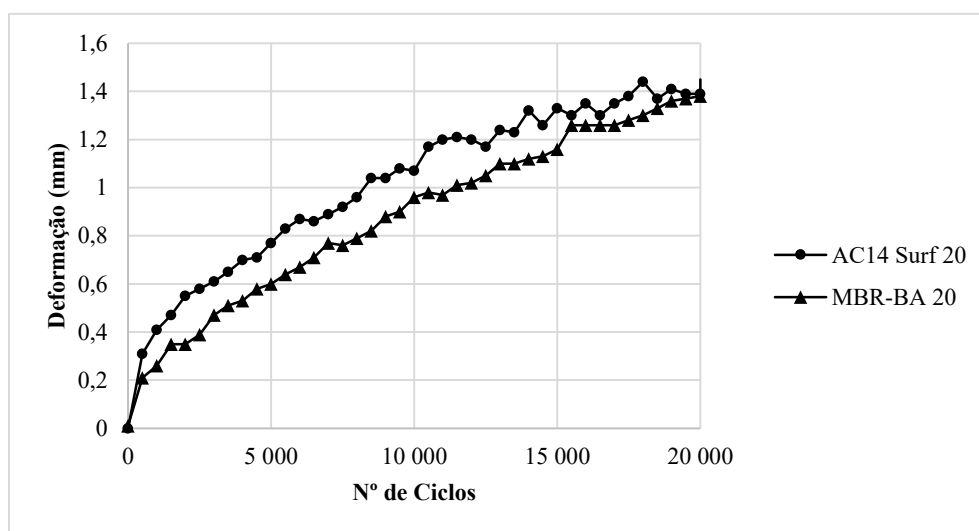


Figura 4.43 – Deformação permanente à temperatura de 20°C

Na Figura 4.44 está representada, para a temperatura de 40°C, a evolução da deformação do grupo de lajes AC14 Surf 40 e MBR-BA 40 ao longo do ensaio *Wheel Tracking*.

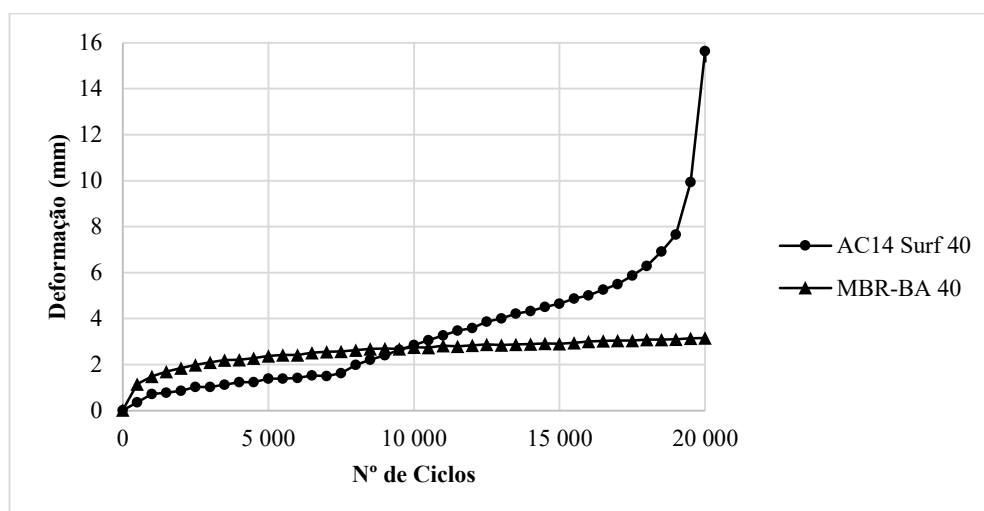


Figura 4.44 – Deformação permanente à temperatura de 40°C

Apresenta-se, no Quadro 4.43, os resultados do ensaio *Wheel Tracking* para os diferentes grupos de lajes.

Quadro 4.43 – Resultados do ensaio *Wheel Tracking* para diferentes combinações de lajes

Lajes	Temp. Ensaio (°C)	Espessura Laje (mm)	Final do ensaio		RD _{AIR} (mm)	PRD _{AIR} (%)	WTS _{AIR} (mm/10 ³ ciclos)
			Duração (min)	Nº ciclos			
AC14 Surf + MBR-BA	20	92,68	766	20000	1,39	1,50%	0,042
	40	92,54	766	20000	3,12	3,37%	0,052
AC14 Surf + AC14 Surf	20	91,38	766	20000	1,45	1,59%	0,060
	40	91,33	766	20000	15,63	17,11%	0,301

Do Quadro 4.43 podem obter-se várias observações. Para a temperatura de ensaio de 20°C o comportamento, à deformação permanente, do grupo de lajes AC14 Surf + MBR-BA é ligeiramente melhor do que o do grupo de lajes AC14 Surf + AC14 Surf. Este último apresenta uma média da variação da deformação permanente ao ar, WTS_{AIR}, cerca de 1,5 vezes superior. Para a temperatura de ensaio de 40°C a diferença é bem mais acentuada. Para o grupo de lajes AC14 Surf + AC14 Surf o valor de WTS_{AIR} é mais de 5 vezes superior. A mesma diferença se verifica para a profundidade média da rodeira, RD_{AIR}, e para a média proporcional da profundidade da rodeira, PRD_{AIR}.

Relembrando o ensaio *Wheel Tracking* às lajes das misturas betuminosas MBR-BA e AC14 Surf sem fenda induzida, à temperatura de 60°C, (valores de WTS_{AIR}, RD_{AIR} e PRD_{AIR}

resumidos no Quadro 4.25) verifica-se que a mistura betuminosa AC14 Surf apresentou uma média da variação da deformação permanente ao ar, WTS_{AIR} , cerca de 2 vezes superior à mistura MBR-BA. Neste caso, com a presença de uma fenda induzida, na temperatura de 40°C, esta diferença foi maior (5 vezes).

De acordo com os resultados obtidos pode inferir-se que a mistura betuminosa com borracha adicionada por via seca, MBR-BA, para além de ter um melhor comportamento à deformação permanente do que a mistura betuminosa sem borracha, AC14 Surf, também apresenta uma melhor resposta à presença de fendas nas camadas que a suportam.

5 CONCLUSÕES

5.1 Trabalho Realizado

Neste trabalho foram produzidas e caracterizadas, em laboratório, uma mistura betuminosa rugosa com alta percentagem de borracha adicionada por via seca, designada por MBR-BA, e uma mistura betuminosa de controlo sem borracha do tipo AC14 Surf. Verificou-se laboratorialmente o desempenho estrutural das misturas betuminosas com principal enfoque no que respeita à resistência à progressão de fendilhamento nas próprias misturas. Dos ensaios realizados destacaram-se o ensaio de fadiga a provetes prismáticos com e sem fenda induzida, e o ensaio de deformação permanente a lajes retangulares também com e sem fenda induzida.

5.2 Principais Inferências e Orientações de Aplicação

A análise do comportamento das misturas betuminosas à ação da água permite verificar que ambas cumprem os limites impostos pelo CET EP (EP 2014), apresentando valores de ITSR próximos dos 100%. Para a percentagem ótima de betume, verificou-se que, em relação à mistura betuminosa de controlo, a mistura MBR-BA foi menos sensível à água.

Na avaliação do comportamento à deformação permanente, verificou-se que a mistura MBR-BA apresentou um melhor comportamento do que a mistura betuminosa de controlo. A mistura AC14 Surf, na percentagem ótima de betume (5,0%), em relação à mistura MBR-BA, também na percentagem ótima em betume (8,0%), apresentou cerca do dobro da média da variação da deformação permanente ao ar (WTS_{AIR}). O mesmo aconteceu para os valores da média proporcional da profundidade da rodeira (PRD_{AIR}) e da profundidade média da rodeira (RD_{AIR}).

Esta melhoria do comportamento à deformação permanente da mistura MBR-BA face à mistura betuminosa de controlo poderá estar associada à maior viscosidade do betume-borracha em relação ao betume convencional, que contribui para uma menor deformação por corte da mistura para a mesma temperatura.

Nos ensaios de avaliação do módulo de deformabilidade das misturas betuminosas constatou-se que o módulo de deformabilidade da mistura MBR-BA foi inferior ao módulo de deformabilidade da mistura AC14 Surf. Tal ocorrência poderá estar relacionada com o facto de a mistura MBR-BA, por possuir granulado de borracha, acomodar maior quantidade de ligante, traduzindo-se num comportamento mais flexível da mesma. Relativamente aos ângulos de fase verificou-se que a mistura MBR-BA, principalmente para as frequências mais baixas, apresentou valores de ângulos de fase mais baixos que a mistura betuminosa de controlo. Tal evidência estará relacionada com o facto do material com incorporação de borracha apresentar um comportamento mais elástico, ou seja, apresentar valores de ângulo de fase mais próximos de zero.

No que respeita ao comportamento à fadiga das misturas betuminosas apurou-se que a mistura MBR-BA apresentou melhor comportamento à fadiga que a mistura betuminosa de controlo. A mistura MBR-BA, em relação à mistura AC14 Surf, para o mesmo número de ciclos de carga, suportou um nível de extensão bastante superior. De forma análoga, para o mesmo nível de extensão, a mistura betuminosa com borracha suportou um número de ciclos de carga, também, bastante superior (pelo menos 6 vezes mais).

De forma a perceber como se comportavam as misturas betuminosas perante condições de serviço mais exigentes, nomeadamente a presença de fendilhamento nas camadas que as suportam, foi efetuada uma análise do comportamento à fadiga e à deformação permanente, em provetes com fendilhamento induzido.

Do ensaio de fadiga a vigas com fenda induzida foi possível observar que a mistura MBR-BA teve uma maior capacidade para resistir à propagação de fendas. Para o critério de paragem de 50% do módulo de deformabilidade inicial, a mistura MBR-BA, em relação à mistura betuminosa de controlo, suportou um número de ciclos bastante mais elevado (mais de 20 vezes superior). Para o critério de paragem de 20% do módulo de deformabilidade inicial, esta diferença foi ainda maior (cerca de 40 vezes superior). Quando comparado o número de ciclos que cada mistura suportou em provetes com fenda induzida e em provetes sem fenda induzida, verificou-se uma diferença acentuada entre a mistura MBR-BA e a mistura AC14 Surf. Como seria de esperar, ambas as misturas, com provetes com fenda induzida, suportam um número de ciclos inferior às misturas com provetes sem fenda induzida, sendo esta diferença muito mais acentuada na mistura betuminosa de referência do que na mistura MBR-BA. Verificou-se, portanto, que a mistura MBR-BA possui uma maior

capacidade para absorver os acréscimos de tensão gerados na zona envolvente à fenda induzida nos provetes, ou seja, terá uma maior capacidade para resistir à propagação de fendas.

Relativamente ao ensaio de deformação permanente com fenda induzida foi possível inferir que a mistura MBR-BA, para além de ter um melhor comportamento à deformação permanente do que a mistura betuminosa de referência, também apresenta uma melhor resposta à presença de fendas nas camadas que a suportam. Para a temperatura de ensaio de 20°C o comportamento, à deformação permanente, do grupo de lajes AC14 Surf + MBR-BA foi ligeiramente melhor do que o do grupo de lajes AC14 Surf + AC14 Surf. Para a temperatura de ensaio de 40°C a diferença foi bem mais acentuada. No ensaio *Wheel Tracking* às lajes das misturas MBR-BA e AC14 Surf sem fenda induzida, à temperatura de 60°C, verificou-se que a mistura AC14 Surf apresentou uma média da variação da deformação permanente ao ar, WTS_{AIR} , cerca de 2 vezes superior à mistura MBR-BA. Neste caso, com a presença de uma fenda induzida, na temperatura de 40°C, esta diferença foi maior (5 vezes superior).

Desta forma, tanto do ensaio de deformação permanente com fenda induzida como do ensaio de fadiga com fenda induzida, se verificou que a mistura betuminosa com borracha apresentou uma melhor resposta à presença de fendas nas camadas que a suportam, tornando-se assim evidente o benefício da sua aplicabilidade em reforço de pavimentos que exibam fendilhamento apreciável.

Com este trabalho pode concluir-se que as misturas betuminosas com alta percentagem de borracha adicionada por via seca apresentam um melhor desempenho estrutural que as misturas betuminosas sem borracha, com um efeito pronunciado na resistência à progressão de fendilhamento na própria mistura, o que traduz um comportamento que deve ser valorado quando se pretende reabilitar pavimentos com deterioração avançada provocada por aquele tipo de degradação.

Para efeitos de dimensionamento de um reforço sobre um pavimento fendilhado, considerando plausível a utilização dum coeficiente de translação de 2 para aplicação real (hipótese também verificada em Claessen et al. (1977), embora a indicação para a avaliação, por exemplo, à fadiga pelo método da Shell tivesse sido dada noutro sentido) ou seja sendo

muito conservador, considerando que a vida útil da mistura betuminosa em serviço é metade da vida útil verificada em laboratório, indica-se o seguinte como orientação prática:

- no que respeita à resistência à fadiga, para um valor final do módulo de deformabilidade de 50% do valor inicial, um pavimento fendilhado reforçado com a mistura MBR-BA terá uma vida útil pelo menos 10 vezes superior a um pavimento reforçado com a mesma espessura de uma mistura do tipo AC14 Surf;
- ainda relativamente à resistência à fadiga, para um valor final do módulo de deformabilidade de 20% do valor inicial, um pavimento fendilhado reforçado com a mistura MBR-BA terá uma vida útil pelo menos 20 vezes superior a um pavimento reforçado com a mesma espessura de uma mistura do tipo AC14 Surf;
- em termos de comportamento à deformação permanente, um pavimento fendilhado reforçado com a mistura MBR-BA terá uma vida útil pelo menos 2,5 vezes superior a um pavimento reforçado com a mesma espessura de uma mistura do tipo AC14 Surf.

Na indicação anterior diz-se que a mistura convencional com que se compara é “do tipo AC14Surf” porque se tem a convicção que misturas do tipo AC20 reg ou AC20 bin terão do ponto de vista dos comportamentos assinalados uma resposta semelhante ao AC14 surf (a constituição é parecida, apresentando estas misturas em relação ao AC14 Surf, uma percentagem de betume semelhante e um limite granulométrico pouco maior). Acrescenta-se que esta indicação se encontra em linha com o verificado em estudos anteriores (Branco et al. 2006) embora sendo até um pouco mais conservadora.

5.3 Trabalhos Futuros

A continuidade deste trabalho será fundamental para melhorar o conhecimento deste tipo de misturas betuminosas com borracha. Para tal será importante a repetição dos estudos de fadiga e de deformação permanente para outras temperaturas de ensaio, tanto para os provetes sem fendilhamento como para os provetes com fenda induzida. Complementarmente ao estudo laboratorial, e de forma a corroborar o melhor comportamento da mistura MBR-BA relativamente à mistura betuminosa de referência, será essencial a realização de um conjunto de trechos experimentais que permitam a execução de camadas de desgaste de espessuras equivalentes com misturas betuminosas sem adição de borracha e com misturas betuminosas com adição de borracha por via seca, onde se possa

implementar um plano de instrumentação do pavimento de forma a caracterizar a evolução do fendilhamento e das demais deformações do pavimento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO, 1993. *Guide for design of pavement structures*, Washington, D. C.: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- AASHTO, 2001. *Standard Test Method for Determining the Permanent Shear Strain and Stiffness of Asphalt Mixtures Using the Superpave Shear Test (SST)*. AASHTO TP7-01, USA: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- AASHTO, 2008. *Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide - A Manual of Practice*, Washington, D. C.: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- Airey, G.D. & Choi, Y.K., 2002. State of the art report on moisture sensitivity test methods for bituminous pavement materials. *International Journal of Road Material and Pavement Design*, pp.355–372.
- Airey, G.D., Rahman, M.M. & Collop, A.C., 2003. Absorption of Bitumen Into Crumb Rubber Using the Basket Drainage Method. *International Journal of Pavement Engineering*, 4, pp.105–119.
- Akisetty, C.K., Lee, S.J. & Amirghanian, S.N., 2010. Laboratory Investigation of the Influence of Warm Asphalt Additives on Long-Term Performance Properties of CRM Binders. *International Journal of Pavement Engineering*, 11(2), pp.153–160.
- Almeida, A. & Picado-Santos, L., 2012. Calculation of the Pavement response to Dynamic Loads by the Boundary Element Method. In *European Pavement and Asset Management – EPAM4*. Malmö, Sweden.
- Antunes, D., Capitão, S. D., Martinho, F. & Picado-Santos, L., 2015. Formulação e Propriedades de uma Mistura Betuminosa Temperada, do Tipo SMA, com Material Betuminoso Reciclado. In *XVIII CILA – Congresso Ibero-LatinoAmericano do Asfalto*. Bariloche, Argentina, pp. 5–11.
- Antunes, M.L., Batista, F., Eusébio, M. I., Costa, M. S. & Miranda, C. V., 2000. Characterisation of asphalt rubber mixtures for pavement rehabilitation projects in Portugal. In *Asphalt Rubber 2000*. Vilamoura, Portugal, pp. 285–307.
- Asphalt-Institute, 1991. *Thickness Design - Asphalt Pavements for Highways and Streets*, Lexington, KY: Asphalt Institute.
- ASTM, 2002. *Standard Test Method for Metal Powder Specific Surface Area by Physical*

- Adsorption*. ASTM B922, Philadelphia: American Society for Testing and Materials.
- Ayres, M., 1997. *Development of a Rational Probabilistic Approach for Flexible Pavement Analysis*. College Park, MD: University of Maryland.
- Azevedo, J., Capitão, S. D., Rasteiro, D. & Picado-Santos, L., 2015. Analysis Of The Evolution Of Flexible Pavement Conditions Based On Ltp Sps-5 Sections. In *9th International Conference on Managing Pavement Assets (ICMPA9)*. Alexandria, Washington.
- Baker, T.E., Allen, T. M., Jenkins, D. V., Mooney, D. T. & Pierce, L. M., 2003. *Evaluation of the Use of Scrap Tires in Transportation Related Applications in the State of Washington: Report to the Legislature as Required by SHB 2308*, Olympia: Washington State Department of Transportation.
- Baptista, A.M., 2006. *Misturas Betuminosas Recicladas a Quente em Central: contribuição para o seu estudo e aplicação*. Tese de Doutoramento. Coimbra: Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.
- Baptista, A.M., Picado-Santos, L. & Capitão, S.D., 2013. Design of hot-mix recycled asphalt concrete produced in plant without preheating the reclaimed material. *International Journal of Pavement Engineering*, 14(2), pp.95–102.
- Batista, F., Antunes, M.L. & Fonseca, P., 2006. Desempenho de Misturas Betuminosas com BMB Aplicadas em Portugal. In *IV Congresso Rodoviário Português “Estrada 2006.”* Estoril, Portugal.
- Batista, F. & Antunes, M.L., 2009. *Ensaio de comparação interlaboratorial para avaliação da sensibilidade à água de misturas betuminosas compactadas*, Relatório DT/09. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- Di Benedetto, H., De la Roche, C. & 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, Londres: Ed. L. Francken.
- Benta, A., Duarte, C., Almeida-Costa, A., Cordeiro, T. & Pereira, R., 2015. Design and Performance of a Warm High-Modulus Asphalt Concrete. *Journal of Cleaner Production*, 95, pp.55–65.
- Branco, F., Ferreira, P. & Picado-Santos, L., 2006. *Pavimentos Rodoviários*, Coimbra: Edições Almedina, SA.
- Caltrans, 2003. *Asphalt Rubber Usage Guide*, State of California Department of Transportation. California, USA: Sacramento, CA.
- Cao, W., 2007. Study on Properties of Recycled Tire Rubber Modified Asphalt Mixtures Using Dry Process. *Construction and Building Materials*, 21(5), pp.1011–1015.

-
- Capitão, S.D., 2003. *Caracterização Mecânica de Misturas Betuminosas de Alto Módulo de Deformabilidade*. Tese de Doutoramento. Coimbra: Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.
- Capitão, S.D. & Picado-Santos, L., 2006a. Applications, Properties and Design of High Modulus Bituminous Mixtures (HMBM). *International Journal of Road Materials and Pavement Design*, 7(1), pp.103–117.
- Capitão, S.D. & Picado-Santos, L., 2006b. Assessing Permanent Deformation Parameters in High Modulus Bituminous Mixtures. *ASCE-Journal of Transportation Engineering*, 132(5), pp.394–401.
- Capitão, S.D., Picado-Santos, L. & Martinho, F., 2012. Pavement engineering materials: Review on the use of warm-mix asphalt. *Construction and Building Materials*, 36, pp.1016–1024.
- CEDEX, 2007. Manual de Empleo de NFU en mezclas bituminosas.
- CEN, 2001a. *Bituminous Mixtures - Test Methods for Hot Mix Asphalt - part 10: Compactability*. EN 12697-10, Bruxelas: European Committee for Standardization.
- CEN, 2001b. *Determination of flash and fire points - Cleveland open cup method*. EN ISO 2592, Bruxelas: European Committee for Standardization.
- CEN, 2003a. *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 22: wheel tracking*. EN 12697-22, Bruxelas: European Committee for Standardization.
- CEN, 2003b. *Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt - Part 33: Specimen prepared by roller compactor*. EN 12697-33, Bruxelas: European Committee for Standardization.
- CEN, 2004a. *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 24: Resistance to fatigue*. EN 12697-24, Bruxelas: European Committee for Standardization.
- CEN, 2004b. *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 26: Stiffness*. EN 12697-26, Bruxelas: European Committee for Standardization.
- CEN, 2005. *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 25: Cyclic compression test*. EN 12697-25, Bruxelas: European Committee for Standardization.
- CEN, 2007a. *Bitumen and bituminous binders. Determination of the softening point. Ring and Ball method*. EN 1427, Bruxelas: European Committee for Standardization.
- CEN, 2007b. *Bitumen and bituminous binders - Determination of needle penetration*. EN 1426, Bruxelas: European Committee for Standardization.
- CEN, 2008. *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt. Part 12 - Determination of the water sensitivity of bituminous specimens*. EN 12697-12, Bruxelas: European Committee for Standardization.

- CEN, 2010a. *Materials produced from end of life tyres - Specification of categories based on their dimension(s) and impurities and methods for determining their dimension(s) and impurities*. CEN/TS 14243, Bruxelas: European Committee for Standardization.
- CEN, 2010b. *Tests for geometrical properties of aggregates; Part 10: Assessment of fines - Grading of filler aggregates (air jet sieving)*. EN 933-10, Bruxelas: European Committee for Standardization.
- CEN, 2015. *Bitumen and bituminous binders - Determination of the Fraass breaking point*. EN 12593, Bruxelas: European Committee for Standardization.
- Claessen, A., Edwards, J., Sommer, P. & Ugé, P., 1977. Asphalt Pavement Design Manual: the SHELL Method. In *4th International Conference on Structural Design of Asphalt Pavements*. Ann Arbor-Michigan: University of Michigan.
- Cong, P., Xun, P., Xing, M. & Chen., S., 2013. Investigation of Asphalt Binder Containing Various Crumb Rubbers and Asphalts. *Construction and Building Materials*, 40, pp.632–641.
- Crucho, J., 2011. *Contribuição para o estudo da resistência à fadiga de misturas betuminosas com incorporação de ASIC*, Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil. Lisboa: Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa.
- Dasek, O., Kudrna, J., Kachtík, J. & Spies, K., 2012. Asphalt rubber in Czech Republic. In *Asphalt rubber 2012*. Munich.
- Dong, D., X. Huang, X.L. & Zhang., L., 2012. Swelling Process of Rubber in Asphalt and Its Effect on the Structure and Properties of Rubber and Asphalt. *Construction and Building Materials*, 29, pp.316–322.
- EP, 2014. *Caderno de Encargos Tipo Obra - Pavimentação*, Lisboa, Portugal: Estradas de Portugal.
- Fager, G.A., 2001. *Asphalt Rubber: A Summary of the Use of Crumb Rubber in the Hot Mixes: Kansas Experience 1990-2000*, Kansas, USA: Kansas Department of Transportation.
- Feiteira Dias, J. & Picado-Santos, L., 2008. Characteristics of Asphalt Binders Modified with the Incorporation of Recycled Crumbled Rubber. In *3rd European Pavement and Asset Management Conference - Proceedings in CD-ROOM, paper 1144*. Coimbra, Portugal.
- Feiteira Dias, J. & Picado-Santos, L., 2009. Avaliação de Desempenho de Misturas Betuminosas Rugosas com Incorporação de Alta Percentagem de Granulado de Borracha de Pneus Usados. In *XV Congresso Ibero-Latino Americano do Asfalto*. Lisboa.
- Feiteira Dias, J., 2011. *Misturas Betuminosas Incorporando por Via Seca Borracha de*

-
- Pneus Usados - Caracterização e Validação Tecnológica*. Tese de Doutoramento. Coimbra: Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.
- Feiteira Dias, J., Picado-Santos, L. & Capitão, S.D., 2014. Mechanical performance of dry process fine crumb rubber asphalt mixtures placed on the Portuguese road network. *Construction and Building Materials*, 73, pp.247–254.
- FHWA, 1998. *User Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction*. FHWA-RD-97-148, Washington, D. C.: United States Department of Transportation - Federal Highway Administration.
- FHWA, 2005. *User Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction*, Washington, D. C.: Federal Highway Administration.
- Fontes, L., Pereira, P., Pais, J. C. & Trichês, G., 2006. Behaviour of asphalt rubber mixtures from different crumb rubber and asphalt binder sources. In *Asphalt Rubber 2006*. Palm Springs, Califórnia, USA, pp. 619–639.
- Fontes, L., Trichês, G., Pereira, P. & Pais, J. C., 2007. Desempenho de misturas betuminosas com betume modificado com borracha através do processo húmido. In *XIV CILA : Congresso Ibero-Americano del Asfalto*. La Habana, Cuba.
- Fontes, L., 2009. *Optimização do Desempenho de Misturas Betuminosas com Betume Modificado com Borracha para Reabilitação de Pavimentos*. Tese de Doutoramento. Guimarães: Escola de Engenharia, Universidade do Minho.
- Fontes, L., Glicerio, T. & C. Jorge, A.P., 2010. Evaluating Permanent Deformation in Asphalt Rubber Mixtures. *Construction and Building Materials*, 24(7), pp.1193–1200.
- Freire, A., Antunes, M.L. & Picado-Santos, L., 2006. Characterization of Bituminous Mixtures for Numerical Modeling of Permanent Deformations. *International Journal of Road Materials and Pavement Design*, 7(1), pp.87–102.
- Gallego, J., Del Val, M.A. & Tomas, R., 2000. Spanish experience with asphalt pavements modified with tire rubber. In *Asphalt Rubber 2000*. Vilamoura, Portugal.
- Gardete, D., Picado-Santos, L., Pais, J.C. & Luzia, R., 2008. Ensaios laboratoriais para caracterização de misturas betuminosas à deformação permanente. In *5º Congresso Luso-Moçambicano de Engenharia*. Maputo, Moçambique.
- Gardete, D., Picado-Santos, L. & Pais, J.C., 2008. Permanent deformation characterization of bituminous mixtures using laboratory tests. *International Journal of Road Materials and Pavement Design*, 9(3), pp.537–548.
- Gardete, D., Picado-Santos, L. & Capitão, S.D., 2012. Analysing the Gyratory Compaction Design Level for a Dense Mixture and a Stone Mastic Asphalt. In *European Pavement and Asset Management – EPAM4*. Malmo, Sweden.

- Gardete, D., Picado-Santos, L. & Capitão, S.D., 2013. Influência da energia de compactação giratória nas propriedades volumétricas e na resistência à deformação permanente de misturas betuminosas. In *XVII Congresso Ibero-Latinoamericano do Asfalto*. Antigua, Guatemala.
- Hassan, N.A., Hainin, M. R., Yaacob, H. Ismail, C. R. & Yunus, Z. M., 2013. Evaluation on Mix Design and Rutting Resistance of Dry Mixed Rubberised Asphalt Mixtures. *Jurnal Teknologi*, 65, pp.115–120.
- Hassan, N.A., Airey, G. D., Jaya, R. P., Mashros, N. & Aziz, M. A., 2014. A Review of Crumb Rubber Modification in Dry Mixed Rubberised Asphalt Mixtures. *Jurnal Teknologi*, 70, pp.127–134.
- Hassan, N.A., Airey, G. D., Yusoff, I., Hainin, M. R., Putrajaya, R., Abdullah, M. E. & Aziz, M. A., 2015. Microstructural characterisation of dry mixed rubberised asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, 82, pp.173–183.
- Heitzman, M., 1992. *State of the Practice - Design and construction of asphalt paving materials with Crumb Rubber Modifier*, Washington, D. C.: Federal Highway Administration.
- Hernández-Olivares, F., Witoszek-Schultz, B., Alonso-Fernaández, M. & Benito-Moro, C., 2009. Rubber-modified hot-mix asphalt pavement by dry process. *International Journal of Pavement Engineering*, pp.277–288.
- Hicks, R.G., 2002. *Asphalt Rubber Design and Construction Guidelines, Volume I – DESIGN GUIDELINES*, Sacramento, California, USA: NCRCTC and CIWMB.
- Hicks, G., Cheng, D. & Teesdale, T., 2010. *Assessment of Warm Mix technologies for use with Asphalt Rubber paving application. Tech-Report-103TM*, California: California Integrated Waste Management Board.
- Holleram, G. & Reed, J.R., 2000. Emulsification of Asphalt Rubber Blends. Asphalt Rubber. In *Asphalt Rubber 2000*. Vilamoura, Portugal.
- Huang, B., Mohammad, L. N., Graves, P. S. & Abadie, C., 2002. Louisiana Experience with Crumb Rubber-Modified Hot-Mix Asphalt Pavement. *Journal of the Transportation Research Board*, 1789, pp.1–13.
- Hunt, E.A., 2002. *Crumb Rubber Modified Asphalt Concrete in Oregon*, Oregon, USA: Oregon Department of Transportation and Federal Highway Administration.
- IPQ, 2011a. *Betumes e ligantes betuminosos. Especificações para betumes de pavimentação. NP EN 12591*, Lisboa: Instituto Português da Qualidade.
- IPQ, 2011b. *Ensaio das propriedades geométricas dos agregados. Parte 9: Avaliação dos finos; Ensaio do azul de metileno. NP EN 933-9*, Lisboa: Instituto Português da Qualidade.

-
- IPQ, 2011c. *Ensaaios das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Parte 2: Métodos para a determinação da resistência à fragmentação. NP EN 1097-2*, Lisboa: Instituto Português da Qualidade.
- IPQ, 2012a. *Ensaaios das propriedades geométricas dos agregados. Parte 8: Determinação do teor de finos – Ensaio do equivalente de areia. NP EN 933-8*, Lisboa: Instituto Português da Qualidade.
- IPQ, 2012b. *Ensaaios das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Parte 1: Determinação da resistência ao desgaste (micro-Deval). NP EN 1097-1*, Lisboa: Instituto Português da Qualidade.
- IPQ, 2014a. *Ensaaios das propriedades geométricas dos agregados. Parte 1: Análise granulométrica; Método da peneiração. NP EN 933-1*, Lisboa: Instituto Português da Qualidade.
- IPQ, 2014b. *Ensaaios das propriedades geométricas dos agregados. Parte 3: Determinação da forma das partículas; Índice de achatamento. NP EN 933-3*, Lisboa: Instituto Português da Qualidade.
- IPQ, 2016a. *Betumes e ligantes betuminosos; Determinação da resistência ao envelhecimento sob a influência do calor e do ar. Parte 1: Método RTFOT. NP EN 12607-1*, Lisboa: Instituto Português da Qualidade.
- IPQ, 2016b. *Betumes e ligantes betuminosos. Determinação da solubilidade. NP EN 12592*, Lisboa: Instituto Português da Qualidade.
- IPQ, 2016c. *Ensaaios das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Parte 6: Determinação da massa volúmica e da absorção de água. NP EN 1097-6*, Lisboa: Instituto Português da Qualidade.
- ISO, 1977. *Plastics - Determination of apparent density of material that can be poured from a specified funnel. ISO 60*, Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization.
- Kaloush, K.E., 2001. *Simple Performance Test for Permanent Deformation of Asphalt Mixtures*. Tempe, AZ: Arizona State University.
- Khalid, H. & Artamendi, I., 2002. Exploratory Study to Evaluate The Properties of Rubberised Asphalt Modified Using the Wet and Dry Process. In *3rd International Conference on Bituminous Mixtures and Pavement*. Thessaloniki, Greece.
- Leahy, R.B., 1989. *Permanent Deformation Characteristics of Asphalt Concrete*. College Park, MD: University of Maryland.
- Lee, S. J., Akisetty, C.K. & Amirkhanian, S., 2008. The Effect of Crumb Rubber Modifier on the Performance Properties of Rubberized Binders in HMA pavements. *Construction and Building Materials*, 22(7), pp.1328–1376.

- Leite, L., Edel, A., Motta, L. & Nascimento, L., 2003. Asphalt Rubber in Brazil: Pavement Performance and Laboratory Study. In *Asphalt Rubber Conference*. Brasília, Brasil.
- Li, Q., Wang, K. & Hall, K., 2010. Verification of virtual climatic data in MEPDG using the LTPP Database. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 3(1), pp.10–15.
- LNEC, 2006. *Misturas betuminosas abertas com betume modificado com alta percentagem de borracha – MBA-BMB*, Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- LNEC, 2008. *Misturas betuminosas rugosas com betume modificado com alta percentagem de Borracha – MBR-BMB*, Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- López-Moro, F.J., Moro, M. C., Hernández-Olivares, F., Schultz, B. W. & Alonso-Fernández, M., 2013. Microscopic Analysis of the Interaction Between Crumb Rubber and Bitumen in Asphalt Mixtures Using the Dry Process. *Construction and Building Materials*, 48, pp.691–699.
- Marques Almeida, A. & Picado-Santos, L., 2015. Methodological Framework for Truck-Factor Estimation Considering Vehicle–Pavement Interaction. *Journal of Transportation Engineering*, 141(2). Available at: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)TE.1943-5436.0000726](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000726).
- Martinho, F., Capitão, S.D. & Picado-Santos, L., 2012. Sustainable Pavements: Warm Asphalt Mixtures Made With Recycled Aggregates from Different Industrial By-Products. In *European Pavement and Asset Management – EPAM4*. Malmo, Sweden.
- Martinho, F., Picado-Santos, L. & Neves, J., 2013. Efeitos da adição de fibras celulósicas e misturas recicladas no desempenho de misturas betuminosas temperadas. In *XVII Congresso Ibero-Latinoamericano do Asfalto*. Antigua, Guatemala.
- Martinho, F., 2014. *Misturas Betuminosas Temperadas com Incorporação de Subprodutos Industriais – Caracterização e Validação Tecnológica*. Tese de Doutoramento. Lisboa: Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa.
- Martinho, F., Picado-Santos, L., Capitão, S. D. & Neves, J., 2015. Desempenho de misturas betuminosas temperadas (MBT) com altas taxas de incorporação de betão estrutural britado (RCDb). In *XVIII CILA – Congresso Ibero-LatinoAmericano do Asfalto*. Bariloche, Argentina, pp. 5–1.
- Martins, L.L. & Ribeiro, A., 2012. *Avaliação de incertezas de medição no Laboratório de Ensaio de Materiais para pavimentação (PAVMAT/LNEC) - Ensaio wheel tracking com equipamento de pequena dimensão, procedimento de ensaio B e acondicionamento dos provetes ao ar*, Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- Mavridou, S., Oikonomou, N. & Kalofotias, 2010. Worldwide survey on best (and worse) practices concerning rubberised asphalt mixtures implementation (number of different cases, extent of application). In Thessaloniki: EU-LIFE+ Environment Policy and Governance. ROADTIRE D, 2, 1-1.

-
- Micaelo, R., Gameiro, A. & Picado-Santos, L., 2015. Production of Hot-Mix Asphalt with PMB: Compactability and Mechanical Behaviour Characterization. In *8th RILEM International Symposium on Testing and Characterization of Sustainable and Innovative Bituminous Materials*. Volume 11, RILEM Bookseries, pp. 231–242.
- Ministério de Fomento, 2007. Uso y especificaciones que deben cumplir los ligantes y mezclas bituminosas que incorporen caucho procedente de NFU. *Orden Circular 21/2007*.
- Morea, F. & Zerbino, R., 2015. Wheel tracking test (WTT) conducted under different standards. Study and correlation of test parameters and limits. *Materials and Structures*, 48, pp.4019 – 4028.
- Moreno, F., Rubio, M.C. & Martínez-Echevarría, M.J., 2011. Analysis of Digestion Time and the Crumb Rubber Percentage in Dry-Process Crumb Rubber Modified Hot Bituminous Mixes. *Construction and Building Materials*, 25(5), pp.2323–2334.
- Moreno, F., Rubio, M.C. & Martínez-Echevarría, M.J., 2012. The Mechanical Performance of Dry-Process Crumb Rubber Modified Hot Bituminous Mixes: The Influence Of Digestion Time and Crumb Rubber Percentage. *Construction and Building Materials*, 26(1), pp.466–474.
- Moreno, F., Sol, M., Martín, J., Pérez, M. & Rubio, M. C., 2013. The effect of crumb rubber modifier on the resistance of asphalt mixes to plastic deformation. *Materials & Design*, 47, pp.274–280.
- NCHRP, 2004. *Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures - Final Report*, Washington, D. C.: National Cooperative Highway Research Program.
- Nejad, F., Aghajani, P., Modarres, A. & Firoozifar, H., 2012. Investigating the Properties of Crumb Rubber Modified Bitumen Using Classic and SHRP Testing Methods. *Construction and Building Materials*, 26(1), pp.481–489.
- Neto, S., Farias, M., Mello, L., Pereira, P. & Pais, J. C., 2005. The use of crumb rubber in asphalt mixtures using the dry process. In *International Symposium on Pavement Recycling*. São Paulo, Brasil.
- Neves, J., Crucho, J., Picado-Santos, L. & Martinho, F., 2013. The influence of processed steel slag on the performance of a bituminous mixture. In *9th international Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields*. Trondheim, Norway.
- Nordgren A., T.T., 2012. Dense graded asphalt rubber in cold climate conditions. In *Asphalt Rubber 2012*. Munich.
- Oliveira, J., Silva, H., Pais, J. C., Abreu, L. & Fernandes, S., 2013. Use of a warm mix asphalt additive to reduce the production temperatures and to improve the performance of asphalt rubber mixtures. *Journal of Cleaner Production*, 41, pp.15–22.

- Oliver, J.W.H., 2000. Rutting and Fatigue Properties of Crum Rubber Hot Mix Asphalts. In *Asphalt Rubber*. Portugal.
- Pais, J.C., Pereira, P. & Azevedo, M.C.M., 2000. A reflexão de fendas no dimensionamento de reforços de pavimentos flexíveis. In *1º Congresso Rodoviário Português - Estrada 2000*. LNEC, Lisboa: Centro Rodoviário Português, pp. 627–637.
- Pais, J.C., Pereira, P. & Picado-Santos, L., 2002. Variability of Four Points Bending Beam Fatigue Tests. *International Journal of Pavements*, 1(2), pp.48–58.
- Partl, M., Bahia, H., Canestrari, F., Roche, C., Benedetto, H. & H. Piber, D., 2013. *Advances in Interlaboratory Testing and Evaluation of Bituminous Materials. State-of-the-Art Report of the RILEM Technical Committee 206-ATB*, New York, London: Springer.
- Picado-Santos, L., 2000. Design Temperature on Flexible Pavements: Methodology for Calculation. *International Journal of Road Materials and Pavement Design*, 1(3), pp.355–371.
- Picado-Santos, L. & Feiteira Dias, J., 2009. Assessment Performance of Bituminous Mixtures Incorporating Rubber Modified Bitumen. In *Sixth International Conference on Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Control (MAIREPA6)*. Turin.
- Picado-Santos, L., Baptista, A.M. & Capitão, S.D., 2010. Assessment of the Use of Hot Mix Recycled Asphalt Concrete in Plant. *ASCE-Journal of Transportation Engineering*, 136(12), pp.1159–1164.
- Pinheiro, J.H.M. & Soares, J.B., 2003. The Effect of Crumb Rubber Gradation and Binder-rubber Interaction Time on the Asphalt-rubber Mixture (Dry Process). In *Asphalt-Rubber Conference*. Brasília, Brasil.
- Presti, D. Lo, 2013. Recycled Tyre Rubber Modified Bitumens for road asphalt mixtures: A literature review. *Construction and Building Materials*, 49, pp.863–881.
- Rahman, M., 2004. *Characterisation of Dry Process Crumb Rubber Modified Asphalt Mixtures*, PhD Thesis. Nottingham: University of Nottingham.
- Randall, J., 2012. *Traffic Recorder Instruction Manual*, Texas: Texas Department of Transportation.
- ReRUBBER, 2015. reRubber, LLC. CA Tire Recycling Permit TPID. Available at: <http://www.rerubber.com/crumb-rubber/>.
- Reschner, K., 2008. *Scrap Tire Recycling – A Summary of Prevalent Disposal and Recycling*, Berlin, Germany.
- Roberts, F.L., Kandhal, P. S., Brown, E. R. & Dunning, R. L., 1989. *Investigation and Evaluation of Ground Tire Rubber in Hot Mix Asphalt*, NCAT Report No. 89-3. Auburn, Alabama, USA: National Center for Asphalt Technology.

-
- Santagata, F.A., Canestrari, F. & Pasquini, E., 2007. Mechanical characterisation of asphalt rubber – wet process. In *4th International SIV Congress*. Palermo.
- Schwartz, C.W. & Carvalho, R.L., 2007. *Implementation of the NCHRP 1-37A Design Guide*, Lutherville, Maryland, USA: The University of Maryland, Prepared for Maryland State Highway Administration.
- Shulman, V.L., 2000. *Tyre Recycling After 2000: Status and Options*, Paris, France: European Tyre Recycling Association.
- Silva, H., 2005. *Caracterização do mastique betuminoso e da ligação agregado-mastique*. Tese de Doutoramento. Guimarães: Escola de Engenharia da Universidade do Minho.
- Silva, H., Oliveira, J., Costa, L., Peralta, J. & Batista, F., 2014. Estudo para produção de misturas com betume borracha a menores temperaturas. *Engenharia Civil*, 49, pp.29–42.
- Simões, F., Lopes, F., Ferreira, A. & Micaelo, R., 2013. Aplicação a Portugal do novo método de dimensionamento de pavimentos rodoviários da AASHTO. In *7º Congresso Rodoviário Português*. Lisboa.
- Sousa, J.B., Fonseca, P., Freire, A. & Pais, J. C., 1999. Comparação da Vida à Fadiga e Deformação Permanente entre Misturas com Betume Modificado com Borracha Reciclada de Pneus Convencionais. In *10º Congresso Ibero-Latino del Asfalto*. Sevilha, pp. 2089–2101.
- Sousa, J.B., 2005. Experiences with use of reclaimed rubber in asphalt within Europe. In *Rubber in Roads*. UK.
- Steelmate, 2016. Tire Structure Knowledge. , 2016(março). Available at: <http://www.steel-mate.com/TP-70/tire.html>.
- Stroup-Gardiner, M., Chadbourn, B. & Newcomb, D.E., 1996. Babbitt, Minnesota: Case Study of Pretreated Crumb Rubber Modified Asphalt Concrete. *Journal of the Transportation Research Board*, 1530(5), pp.34–42.
- Takallou, H.B. & Hicks., R.G., 1988. *Development of Improved Mix and Construction Guidelines for Rubber-Modified Asphalt Pavements*, Washington, D. C.: Transportation Research Board.
- Takallou, H.B. & Takallou, M.B., 2003. Effects of Mixing Time and Temperature on the Visco-elastic Properties of Asphalt Rubber Binder. In *Asphalt Rubber 2003*. Brasília, Brasil.
- Terrel, R.L. & Walter, J.L., 1986. Modified Asphalt Pavement Materials-The European Experience. *ournal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 55, pp.82–518.
- Thodesen, C., Shatanawi, K. & Amirkhanian, S., 2009. Effect of Crumb Rubber Characteristics on Crumb Rubber Modified (CRM) Binder Viscosity. *Construction and*

Building Materials, 23(1), pp.295–303.

- Tseng, K. & Lytton, R., 1989. Prediction of Permanent Deformation in Flexible Pavement Materials. Implication of Aggregates in the Design, Construction, and Performance of Flexible Pavements. In Schreuders/Marek, ed. *Implication of Aggregates in the Design, Construction, and Performance of Flexible Pavements*. Philadelphia: American Society for Testing and Materials, pp. 154–172.
- Visser, A.T. & Verhaeghe, B., 2000. Bitumen rubber: Lessons learned in South Africa. In *Asphalt Rubber*. Vilamoura, Portugal.
- Wang, H., Dang, Z., Li, L. & You, Z., 2013. Analysis on Fatigue Crack Growth Laws for Crumb Rubber Modified (CRM) Asphalt Mixture. *Construction and Building Materials*, 47, pp.1342–1349.
- Wanga, H., Danga, Z., Youb, Z. & Caoc, D., 2012. Effect of Warm Mixture Asphalt (WMA) Additives on High Failure Temperature Properties for Crumb Rubber Modified (CRM) Binders. *Construction and Building Materials*, 35, pp.281–288.
- Williamson, P. & Peploe, R., 2006. *Use of Reclaimed Tyre Rubber in Asphalt*, Wellington, New Zeland: Transit New Zeland.
- Wong, C.C. & Won, W., 2007. Effect of Crumb Rubber Modifiers on High Temperature Susceptibility of Wearing Course Mixtures. *Construction and Building Materials*, 21(8), pp.1741–1745.
- Xiao, F., Putman, B.J. & Amirkhanian, S.N., 2006. Laboratory Investigation of Dimensional Changes of Crumb Rubber Reacting with Asphalt Binder. *Asphalt-Rubber Conference*, pp.693–713.
- Yin, J., Wang, S. & LV, F., 2013. Improving the Short-Term Aging Resistance of Asphalt by Addition of Crumb Rubber Radiated by Microwave and Impregnated Inepoxidized Soybean Oil. *Construction and Building Materials*, 49, pp.712–719.
- Zareh, A. & Way, G.B., 2009. Asphalts Rubber 40 Years of use in Arizona. In *Asphalt Rubber 2009*. Nanjing. China.