

Dedico esta dissertação  
à minha família e à minha Pátria



## RESUMO

Em Portugal, nas últimas duas décadas, verificou-se um forte investimento na construção rodoviária. Actualmente, nota-se uma diminuição na construção de novas estradas. Desta forma, surge, um novo desafio: manter a rede rodoviária construída em bom estado de conservação.

Existem diversos processos de reabilitação de pavimentos flexíveis, desde a execução das chamadas "camadas de reforço" até às técnicas de reciclagem de pavimentos degradados, passando, ainda, por técnicas de tratamento das fendas existentes nos pavimentos.

Esta dissertação tem como objectivo o estudo da aplicação de betumes modificados com incorporação de borracha em pavimentos rodoviários. Procura-se desenvolver o conhecimento sobre este tema dando particular atenção às múltiplas soluções existentes.

É também feita uma breve revisão bibliográfica sobre conservação e reabilitação de pavimentos rodoviários flexíveis, sendo feita referência à sua caracterização estrutural e funcional, às degradações que os afectam e às técnicas de conservação e reabilitação existentes.

De seguida, desenvolve-se o tema relacionado com o betume modificado com borracha, onde se mencionam os materiais integrantes, as características e os processos de fabrico. São estudadas as misturas betuminosas com betume modificado com borracha, mencionando os vários tipos de misturas, as principais aplicações, as vantagens e desvantagens e a sua utilização em Portugal.

Finalmente, é realizado um estudo de aplicação de várias misturas betuminosas, entre misturas convencionais e modificadas com borracha, para efeito de comparação da sua vida útil.



## **ABSTRACT**

In Portugal, in the last two decades, there has been a great investment in road construction. Presently, there is a decrease in the construction of new roads. Thus, a new challenge emerges: to keep the existing road network in good condition.

There are several processes for the rehabilitation of flexible pavements since the execution of the so-called "reinforcement layers" to the recycling techniques of degraded pavement or even by using processing techniques for the existing cracks on the road surfaces.

This dissertation aims to study the application of asphalt rubber on road pavements. The aim is to develop knowledge on this subject with particular attention to the numerous existing solutions.

A brief literature review about the preservation and rehabilitation of flexible road pavements will be done referring to their structural and functional characterization, the degradation which affect them and the techniques of preservation and rehabilitation that exist.

Then, the subject related to the asphalt rubber will be developed in a part where the integrated materials, the characteristics and the processes of manufacture will be mentioned. The bituminous mixtures with asphalt rubber will be studied referring to the several types of mixtures, the main applications, the advantages and the disadvantages and their use in Portugal.

Finally, a study on the application of several bituminous mixtures will be realized, from conventional mixtures to modified ones with rubber both to be compared in their useful life.



## **PALAVRAS CHAVE**

Betume modificado com borracha (BMB)

Pavimentos flexíveis

Reabilitação



## **KEY WORDS**

Asphalt rubber (AR)  
Flexible pavements  
Rehabilitation



## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de agradecer, sinceramente, a todos os que, directa e indirectamente, me apoiaram e contribuíram para a concretização deste projecto, em especial:

Ao Professor Doutor António Miguel Costa Baptista, orientador desta dissertação, pelo apoio e pelos conselhos preciosos dados ao longo da execução deste estudo, assim como pelas correcções e sugestões feitas durante a orientação.

À empresa Mota Engil Pavimentações, principalmente, ao Eng.º Duarte, pela visita acompanhada a uma obra de pavimentação com mistura betuminosa com betume modificado com borracha.

Aos colegas e amigos do mestrado, pelo apoio tantas vezes prestado.

Aos meus amigos, pelo apoio e incentivo incondicional, pelo companheirismo e encorajamento.

E, finalmente, à minha família, em particular aos meus pais e irmã, pela compreensão, paciência e carinho que sempre tiveram para comigo.



# ÍNDICE GERAL

RESUMO .....	iii
ABSTRACT .....	v
PALAVRAS CHAVE .....	vii
KEY WORDS .....	ix
AGRADECIMENTOS .....	xi
ÍNDICE GERAL .....	xiii
ÍNDICE DE FIGURAS .....	xvii
ÍNDICE DE QUADROS .....	xix
ABREVIATURAS E SIGLAS .....	xxi
NOTAÇÃO.....	xxiii
1. Introdução.....	1
1.1 Enquadramento .....	1
1.2 Objectivos .....	2
1.3 Organização do trabalho .....	3
2. Dimensionamento e reabilitação de pavimentos rodoviários flexíveis .....	5
2.1 Considerações iniciais.....	5
2.2 Constituição e comportamento dos pavimentos rodoviários .....	5
2.3 Dimensionamento de pavimentos flexíveis .....	10
2.4 Ensaios mecânicos de desempenho .....	11
2.4.1 Estudo da Resistência à Fadiga .....	11
2.4.2 Estudo da Resistência à Deformação Permanente.....	14
2.5 Critérios de ruína .....	16
2.5.1 Lei de Fadiga .....	17
2.5.2 Lei de Deformação Permanente .....	18
2.6 Degradações dos pavimentos rodoviários flexíveis.....	19
2.6.1 Deformações.....	20
2.6.2 Fendilhamento .....	20

2.6.3	Desagregação da camada de desgaste .....	21
2.6.4	Movimento de materiais.....	22
2.7	Reabilitação de pavimentos flexíveis .....	22
2.7.1	Reabilitação das características superficiais .....	23
2.7.2	Reabilitação das características estruturais .....	24
2.8	Dimensionamento da camada de reforço de pavimentos flexíveis .....	25
2.9	Considerações finais.....	28
3.	Misturas Betuminosas com Betume Modificado com Borracha (MB-BMB) .....	29
3.1	Considerações iniciais .....	29
3.2	Materiais integrantes do Betume Modificado com Borracha.....	29
3.2.1	Betume .....	29
3.2.2	Granulado de Borracha .....	33
3.3	Utilização das misturas betuminosas modificadas .....	40
3.4	Betume Modificado com Borracha .....	44
3.5	Processos de fabrico de BMB .....	48
3.5.1	Processo húmido .....	48
3.5.2	Processo seco .....	50
3.5.3	Exemplo de processo de fabrico de BMB em Portugal .....	51
3.6	Vantagens e desvantagens das MB-BMB .....	54
3.6.1	Vantagens e benefícios da MB-BMB .....	54
3.6.2	Desvantagens e limitações do MB-BMB.....	55
3.7	Tipos de misturas com BMB.....	57
3.8	Camadas selantes.....	62
3.8.1	SAM.....	63
3.8.2	SAMI.....	63
3.9	Principais aplicações de MB-BMB .....	65
3.9.1	Na reabilitação de pavimentos .....	65
3.9.2	Na construção de novos pavimentos.....	66
3.10	Utilização de MB-BMB em Portugal .....	66
3.11	Relação custo/benefício.....	67
3.12	Considerações finais .....	68
4.	Estudo da aplicação de MB-BMB .....	69

4.1	Considerações iniciais.....	69
4.2	Casos de estudo.....	70
4.3	Construção de pavimentos novos .....	73
4.3.1	Síntese das estruturas consideradas .....	73
4.3.2	Análise dos resultados .....	75
4.4	Reabilitação de pavimentos sem fresagem .....	77
4.4.1	Síntese das estruturas consideradas .....	77
4.4.2	Análise dos resultados .....	79
4.5	Reabilitação de pavimentos com fresagem.....	85
4.5.1	Síntese das estruturas consideradas .....	85
4.5.2	Análise dos resultados .....	87
4.6	Análise global dos resultados.....	94
5.	Conclusão e trabalhos futuros .....	97
5.1	Conclusões .....	97
5.2	Sugestões para trabalhos futuros.....	98
	ANEXO A - Especificações de betumes .....	101
	ANEXO B - Especificações de MB-BMB .....	111
	ANEXO C - Estudo da redução de ruído .....	113
	REFERÊNCIAS .....	119



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1: Constituição e acções dos pavimentos rodoviários (Branco <i>et al.</i> , 2008) .....	6
Figura 2-2: Estrutura em camadas dos pavimentos rodoviários.....	6
Figura 2-3: Constituição e comportamento dos pavimentos flexíveis (Branco <i>et al.</i> , 2008) .....	8
Figura 2-4: Constituição e comportamento dos pavimentos rígidos (Branco <i>et al.</i> , 2008).....	9
Figura 2-5: Constituição e comportamento dos pavimentos semi-rígidos (Branco <i>et al.</i> , 2008) .....	9
Figura 2-6: Organograma com o procedimento para dimensionamento de pavimentos flexíveis (Baptista, 1999) .....	10
Figura 2-7: Equipamento servo-hidráulico para a realização dos ensaios de flexão alternada (Fontes <i>et al.</i> , 2009).....	12
Figura 2-8: Dispositivo para realização de ensaios em flexão alternada em 4 pontos (Fontes <i>et al.</i> , 2007; Walubita <i>et al.</i> , 2005) .....	12
Figura 2-9: Representação esquemática da configuração de teste em quatro pontos (Pais <i>et al.</i> , 2007; Fontes, 2009) .....	13
Figura 2-10: Equipamento com um provete para a realização do ensaio de corte simples a altura constante RSST-CH da Universidade do Minho (Fontes <i>et al.</i> , 2008) .....	15
Figura 2-11: Extensões dos estados limites de ruína em pavimentos rodoviários flexíveis.....	16
Figura 2-12: Sequência e interacção das degradações (Pereira <i>et al.</i> , 1999).....	20
Figura 2-13: Evolução do estado do pavimento ao longo do tempo (Batista, 2004) .....	24
Figura 2-14: Metodologia de análise do estado de conservação e reabilitação de pavimentos flexíveis (adaptado de Murtinheira, 2011) .....	26
Figura 3-1: Destilação fraccionada do petróleo bruto (adaptado de Lombardi, 1993).....	30
Figura 3-2: Modelo de micelas de Yen (IME, 2011) .....	32
Figura 3-3: Armazenamento inadequado de pneus usados (Silva, 2007).....	34
Figura 3-4: Incêndio de pneus (Notisul, 2010).....	34
Figura 3-5: Destino dos pneus recolhidos em 2009 (Valorpneu, 2010).....	35
Figura 3-6: Aplicações finais da reciclagem (Valorpneu, 2010).....	36
Figura 3-7: Processo mecânico (Neto <i>et al.</i> , 2006) .....	37
Figura 3-8: Processo criogénico (Neto <i>et al.</i> , 2006).....	38
Figura 3-9: Aspecto morfológico da borracha no microscópio óptico (Dias <i>et al.</i> , 2008).....	38
Figura 3-10: Partículas de borracha com dimensões entre 0 e 8 mm e entre 8 e 25 mm .....	39
Figura 3-11: Partículas de borracha com dimensões entre 25 e 40 mm e entre 40 e 70 mm ...	39
Figura 3-12: Partículas de borracha com dimensões entre 70 e 95 mm .....	40
Figura 3-13: Modelo hipotético de interacção entre as partículas de borracha granulada e o betume com as várias etapas de reacção (Holleran <i>et al.</i> , 2000) .....	46
Figura 3-14: Influência da percentagem de granulado de borracha nas características do betume modificado com borracha (Pais <i>et al.</i> , 2007) .....	47

Figura 3-15: Etapas do processo húmido (Neto <i>et al.</i> , 2006) .....	49
Figura 3-16: Etapas do processo seco (Neto <i>et al.</i> , 2006).....	50
Figura 3-17: Instalação do equipamento de fabrico de BMB junto a uma central (Recipav, 2007).....	52
Figura 3-18: Esquema da produção de MB-BMB (Recipav, 2007) .....	53
Figura 3-19: Constituição de uma mistura betuminosa rugosa com BMB (Recipav, 2007) ...	58
Figura 3-20: Constituição de uma mistura betuminosa aberta com BMB (Recipav, 2007) ....	58
Figura 3-21: Fuso granulométrico da mistura de agregados e filler do produto MBR-BMB® (LNEC, 2008) .....	60
Figura 3-22: Fuso granulométrico da mistura de agregados e filler do produto MBA-BMB® (LNEC, 2006) .....	61
Figura 3-23: Esquemas de SAMI simples e num sistema de 3 camadas (Clemson, 2011; Caltrans, 2006) .....	64
Figura 3-24: Camião distribuidor de SAMI (Clemson, 2011) .....	65
Figura 3-25: Evolução da extensão da utilização de MB-BMB em quilómetros .....	67
Figura 3-26: Evolução da quantidade utilizada de BMB em toneladas .....	67
Figura 4-1: Esquema das estruturas A1, A2 e A3 .....	73
Figura 4-2: Esquema das estruturas B1, B2 e B3 .....	74
Figura 4-3: Esquema das estruturas C1, C2 e C3 .....	75
Figura 4-4: Síntese dos valores de vida útil para as estruturas Ai, Bi e Ci .....	77
Figura 4-5: Esquema da estrutura base D .....	78
Figura 4-6: Esquema da estrutura base E.....	79
Figura 4-7: Esquema da estrutura base F .....	79
Figura 4-8: Esquema das estruturas D1, D2 e D3 (após reforço) .....	81
Figura 4-9: Esquema das estruturas E1, E2 e E3 (após reforço).....	82
Figura 4-10: Esquema das estruturas F1, F2 e F3 (após reforço) .....	84
Figura 4-11: Síntese dos valores de vida útil para as estruturas Di, Ei e Fi.....	85
Figura 4-12: Esquema da estrutura base G .....	86
Figura 4-13: Esquema da estrutura base H .....	87
Figura 4-14: Esquema da estrutura base I.....	87
Figura 4-15: Esquema das estruturas G1, G2 e G3 (após reforço) .....	89
Figura 4-16: Esquema das estruturas H1, H2 e H3 (após reforço) .....	91
Figura 4-17: Esquema das estruturas I1, I2 e I3 (após reforço).....	93
Figura 4-18: Síntese dos valores de vida útil para as estruturas Gi, Hi e Ii .....	94
Figura C-1: Pormenor dos pavimentos ensaiados BAC e BMB, nos 4º e 5º Ensaios (Guerra <i>et al.</i> , 2005).....	116
Figura C-2: Pormenor da transição entre os dois tipos de pavimento BMB e BB (Guerra <i>et al.</i> , 2005).....	117

## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2-1: Tipos de pavimentos, materiais e deformabilidade (Branco <i>et al.</i> , 2008).....	7
Quadro 2-2: Factores que afectam a resistência à resistência das misturas betuminosas (adaptado de Fontes, 2009).....	17
Quadro 2-3: Factores que afectam a resistência à deformação permanente das misturas betuminosas (adaptado de Sousa <i>et al.</i> , 1991).....	18
Quadro 2-4: Famílias e tipos de degradações (Pereira <i>et al.</i> , 1999).....	19
Quadro 3-1: Produtos obtidos na destilação do petróleo (Petróleo e Gás, 2011).....	31
Quadro 3-2: Especificação LNEC E 80 (1997) - Propriedades e métodos de ensaio de betumes de pavimentação (LNEC, 1997).....	33
Quadro 3-3: Principais características das misturas MBR-BMB e MBA-BMB (LNEC, 2007).....	58
Quadro 3-4: Características intrínsecas das misturas betuminosas com BMB (adaptado de Fonseca <i>et al.</i> , 2006).....	59
Quadro 3-5: Fusão granulométrico da mistura de agregados e filler do produto MBR-BMB® (LNEC, 2008).....	59
Quadro 3-6: Fusão granulométrico da mistura de agregados e filler do produto MBA-BMB® (LNEC, 2006).....	60
Quadro 3-7: Fusão granulométrico do granulado de borracha (LNEC, 2006).....	61
Quadro 3-8: Misturas betuminosas com as respectivas espessuras consideradas no CEEP (EP, 2009).....	62
Quadro 4-1: Síntese das estruturas alternativas consideradas.....	70
Quadro 4-2: Características mecânicas adoptadas para a camada de desgaste ou reforço.....	71
Quadro 4-3: Classes de fundação e respectivos módulos de deformabilidade (JAE, 1995)....	71
Quadro 4-4: Geometria e características mecânicas das estruturas alternativas A1, A2 e A3..	73
Quadro 4-5: Geometria e características mecânicas das estruturas alternativas B1, B2 e B3..	74
Quadro 4-6: Geometria e características mecânicas das estruturas alternativas C1, C2 e C3..	74
Quadro 4-7: Extensões e vidas úteis das estruturas A1, A2 e A3.....	75
Quadro 4-8: Extensões e vidas úteis das estruturas B1, B2 e B3.....	76
Quadro 4-9: Extensões e vidas úteis das estruturas C1, C2 e C3.....	76
Quadro 4-10: Geometria e características mecânicas das camadas da estrutura de base D.....	77
Quadro 4-11: Geometria e características mecânicas das camadas da estrutura de base E.....	78
Quadro 4-12: Geometria e características mecânicas das camadas da estrutura de base F.....	78
Quadro 4-13: Extensões e vidas úteis da estrutura base D.....	80
Quadro 4-14: Características das estruturas D1, D2 e D3.....	80
Quadro 4-15: Extensões e vidas úteis das estruturas D1, D2 e D3.....	80
Quadro 4-16: Extensões e vidas úteis da estrutura base E.....	81
Quadro 4-17: Características mecânicas das estruturas E1, E2 e E3.....	82

Quadro 4-18: Extensões e vidas úteis das estruturas E1, E2 e E3 .....	83
Quadro 4-19: Extensões e vidas úteis da estrutura base F .....	83
Quadro 4-20: Características mecânicas das estruturas F1, F2 e F3.....	83
Quadro 4-21: Extensões e vidas úteis das estruturas F1, F2 e F3.....	84
Quadro 4-22: Geometria e características mecânicas das camadas da estrutura de base G.....	85
Quadro 4-23: Geometria e características mecânicas das camadas da estrutura de base H.....	86
Quadro 4-24: Geometria e características mecânicas das camadas da estrutura de base I.....	86
Quadro 4-25: Extensões e vidas úteis da estrutura base G .....	88
Quadro 4-26: Características das estruturas G1, G2 e G3, após fresagem e reposição .....	88
Quadro 4-27: Extensões e vidas úteis das estruturas G1, G2 e G3.....	89
Quadro 4-28: Extensões e vidas úteis da estrutura base H .....	90
Quadro 4-29: Características das estruturas H1, H2 e H3, após fresagem e reposição .....	90
Quadro 4-30: Extensões e vidas úteis das estruturas H1, H2 e H3.....	91
Quadro 4-31: Extensões e vidas úteis da estrutura base I.....	92
Quadro 4-32: Características mecânicas da Estrutura I após fresagem e reposição .....	92
Quadro 4-33: Extensões e vidas úteis das estruturas I1, I2 e I3.....	93
Quadro 4-34: Vida útil à fadiga dos casos de estudo.....	94
Quadro 4-35: Vida útil à deformação permanente dos casos de estudo .....	95
Quadro A-1: Tipos de betume de pavimentação, propriedades e exigências de conformidade (LNEC, 1997) .....	101
Quadro A-2: Especificações a respeitar para os betumes modificados com borracha (Norma Europeia EN 12591:1999).....	102
Quadro A-3: Requisitos físicos para o betume modificado com borracha da norma ASTM D 6114-97 (2002) (ASTM, 2002).....	104
Quadro A-4: Propriedades do BMB® (LNEC, 2008) .....	106
Quadro A-5: Características dos betumes modificados com borracha (Cepsa, 2007).....	107
Quadro A-6: Betume borracha BMB-2 (Cepsa, 2010) .....	108
Quadro A-7: Betume borracha BMB-3b da Cepsa (Cepsa, 2010).....	108
Quadro A-8: Características dos betumes modificados com borracha da Galp (Probigalp, 2010) .....	109
Quadro B-1: Propriedades relacionadas com o desempenho estrutural de MBR-BMB® (LNEC, 2008) .....	111
Quadro B-2: Propriedades relacionadas com o desempenho estrutural de MBA-BMB® (LNEC, 2006) .....	112
Quadro C-1: Níveis sonoros Laeq registados nos ensaios BMB vs BAC (Guerra <i>et al.</i> , 2005) .....	116
Quadro C-2: Níveis sonoros Laeq registados nos ensaios BMB vs BB (Guerra <i>et al.</i> , 2005).....	117

## ABREVIATURAS E SIGLAS

A8	Auto-Estrada do Oeste, pertencente à rede de auto-estradas Portuguesa
AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ADOT	Arizona Department of Transportation
AI	Asphalt Institute
AR	Asphalt rubber
ASTM	American Society for Testing and Materials
BD	Betão betuminoso em camada de desgaste
BMB	Betume modificado com borracha
Caltrans	California Department of Transportation
CEEP	Caderno de Encargos da Estradas de Portugal
CEN	Comité Europeu de Normalização
DEC	Departamento de Engenharia Civil
EN	Estrada Nacional
EP	Estradas de Portugal, S.A.
ESTGV	Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu
EPA	United States Environmental Protection Agency
EUA	Estados Unidos da América
EVA	Etileno-acetato de vinilo
FB	Pó de borracha
FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
FHWA	Federal Highway Administration
FWD	Falling Weight Deflectometer
GB	Granulado de borracha
HMA	Hot Mix Asphalt
IEP	Instituto de Estradas de Portugal
IME	Instituto Militar de Engenharia
InIR	Instituto de Infra-Estruturas Rodoviárias
IPV	Instituto Politécnico de Viseu
ISO	International Organization for Standardization
JAE	Junta Autónoma das Estradas
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
MACOPAV	Manual de Conceção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional
MB	Macadame betuminoso em camada de base
MB-BMB	Mistura betuminosa com betume modificado com borracha
MBA-BMB	Mistura betuminosa aberta com betume modificado com borracha
MBD	Mistura betuminosa densa em camada de ligação
MBR-BMB	Mistura betuminosa rugosa com betume modificado com borracha
NLT	Normas del Laboratorio del Transporte
PNR 2000	Plano Rodoviário Nacional 2000
RSST-CH	Repeated Simple Shear Test at Constant Height

RTFOT	Rolling Thin-Film Oven Test
SAM	Stress-absorbing membrane
SAMI	Stress-absorbing membrane interlayer
SAMI-R	Stress-absorbing membrane interlayer-rubber
SBR	Borracha de butadieno estireno
SBS	Estireno-butadieno-estireno
SHRP	Strategic Highway Research Program
SST	Simple Shear Test
TFOT	Thin-Film Oven Test
TVB	Teor volumétrico de betume
TxDOT	Texas Department of Transportation
VMA	Volume de vazios no esqueleto de agregado

## NOTAÇÃO

### a) Maiúsculas latinas

Bg	base granular
°C	grau Celsius
E	módulo de deformabilidade
MPa	megapascal
Sbg	sub-base granular

### b) Minúsculas latinas

cm	centímetro
cP	centi-Poise
dB	decibel
km	quilómetro
kN	quilonewton
kPa	quilopascal
mm	milímetro

### c) Minúsculas gregas

$\varepsilon$	extensão
$\varepsilon_t$	extensão horizontal de tracção
$\varepsilon_z$	extensão vertical de compressão
$\nu$	coeficiente de Poisson
$\mu\text{m}$	micrómetro



# 1. Introdução

## 1.1 Enquadramento

Desde o princípio das civilizações que as vias de comunicação mostraram ter um papel de extrema importância. Em alguns casos, formavam uma rede intrincada e complexa como na Civilização Romana, o que está implícito no provérbio popular: “Todas as estradas vão dar a Roma.” As estradas romanas foram uma das primeiras formas de pavimentação em Portugal.

As estradas eram e continuam a ser um dos meios mais importantes de transporte de pessoas e bens, tendo por isso um papel deveras importante do ponto de vista social e económico para o País.

Desta forma, é essencial mantê-las em bom estado de conservação, de modo a cumprir a sua missão. Segundo o PRN 2000 (Decreto-Lei n.º 222/98 de 17 de Julho), actualmente, a rede rodoviária em Portugal apresenta vários milhares de quilómetros, mas é necessário conservar toda a rede que já está construída. Com uma conservação deficiente, regista-se uma degradação crescente dos pavimentos rodoviários, sendo necessário proceder-se à reabilitação dos pavimentos rodoviários em causa.

Na pavimentação rodoviária o aprofundamento do estudo das misturas betuminosas e dos seus componentes, agregados e ligante betuminoso, tem vindo a assumir uma particular importância. No que respeita ao betumes, desde há muito tempo que se recorre à utilização de aditivos para o melhoramento das características dos betumes utilizados na pavimentação de estradas, com o objectivo de aumentar o período de vida útil das mesmas, assim, como a melhoria doutras características, como por exemplo a drenagem e a aderência.

Ao mesmo tempo, por razões de ordem ambiental, é necessário limitar a utilização de recursos naturais, o que motiva o estudo da aplicação de produtos reciclados na produção de novos materiais. Actualmente, é permitido incorporar materiais reciclados em novos produtos, desde que as propriedades resultantes do processo não sejam inferiores às propriedades iniciais, ou que do conjunto resulte um produto que tenha uma boa relação custo/benefício.

Na área da construção de estradas, há uma grande procura na utilização de materiais recicláveis. Em vários países, estudam-se e aplicam-se produtos resultantes das demolições de prédios, produtos resultantes do fabrico de plásticos, escombros resultantes da produção dos mármore, cinzas das centrais de alto-forno, escórias e pneus usados (Recipav, 2007).

Destes materiais, os pneus de borracha têm recebido especial atenção, pois não existe outra forma de utilização dos resíduos de pneu. Com a proibição da deposição em aterro em 2001, de acordo com o Decreto-Lei n.º 111/2001 de 6 de Abril, a única solução era a queima nos fornos das cimenteiras.

Há 40 anos, em alguns países desenvolvidos, começaram-se a fazer estudos e experiências. Verificou-se que a introdução da borracha reciclada de pneus em betume asfáltico, além de ser uma solução possível para a eliminação dos resíduos de pneu, permitia modificar as propriedades básicas dos betumes tornando-os mais elásticos, e conseqüentemente, evitar o aparecimento de fissuras à superfície dos pavimentos. Ao mesmo tempo percebeu-se que os custos com a conservação dos pavimentos seriam significativamente menores, quando comparados com as soluções tradicionais de pavimentação.

## **1.2 Objectivos**

A forma mais comum de modificar o betume, para melhorar as suas características mecânicas, consiste na adição de plastómeros ou de elastómeros. Como alternativa a este tipo de modificação, têm vindo a ser utilizados betumes modificados com borracha (BMB).

Assim, as misturas modificadas com BMB são uma alternativa possível tendo em vista todas as suas vantagens.

Em Portugal, o LNEC tem acompanhado a utilização de betume modificado com borracha (BMB), na elaboração de relatórios sobre as propriedades do produto e sobre o acompanhamento das obras quer para a RECIPAV, quer para a Estradas de Portugal.

Desta forma, torna-se importante desenvolver o conhecimento referente a este material, pois apresenta grandes potencialidades de exploração e múltiplas aplicações na pavimentação rodoviária.

Tendo em conta as necessidades de pavimentação das estradas de Portugal, a presente dissertação tem como objectivos: estudar as propriedades do betume modificado com a adição de borracha reciclada de pneus; expandir os conhecimentos explorando as potencialidades deste material na reabilitação de pavimentos rodoviários.

### **1.3 Organização do trabalho**

De modo a atingir os objectivos anteriormente mencionados, esta dissertação divide-se em cinco capítulos e três anexos.

Neste primeiro capítulo introdutório, além do enquadramento e justificação da escolha do tema, são descritos os objectivos propostos para a dissertação e a organização da mesma.

No Capítulo 2, “Dimensionamento e reabilitação de pavimentos rodoviários flexíveis”, é abordada a constituição e comportamento dos pavimentos rodoviários flexíveis, dando mais ênfase aos pavimentos flexíveis, visto que estes são de longe os mais utilizados em Portugal.

É ainda feita uma breve síntese do processo de dimensionamento de pavimentos flexíveis, são estudados os critérios de ruína dos pavimentos flexíveis, assim como os ensaios mecânicos das resistências à fadiga e deformação permanente.

Apresentam-se também as patologias e degradações existentes nos pavimentos rodoviários flexíveis, bem como as medidas de reabilitação desses mesmos pavimentos. Por fim, apresenta-se a metodologia do dimensionamento de camadas de reforço.

No Capítulo 3, “Misturas Betuminosas com Betume Modificado com Borracha (MB-BMB)”, são descritos os dois materiais constituintes e são apresentadas as várias formas de utilização da borracha de pneus usados, enfatizando a sua aplicação em obras de pavimentação rodoviária. Aqui são também abordadas as consequências ambientais do destino final dos pneus usados e são enunciados os processos de obtenção do granulado de borracha. Além disso, é feita uma revisão sobre a história da aplicação de misturas betuminosas modificadas e das misturas com betume modificado com borracha, e são descritos os processos de produção do betume modificado com borracha (BMB) por via seca e por via húmida e principais vantagens de cada um.

São apresentadas as vantagens e desvantagens do BMB, apresentam-se os tipos de misturas com BMB e as suas principais aplicações, e também são caracterizadas as camadas selantes SAM e SAMI. Estuda-se a evolução da mesma em Portugal e analisa-se a relação entre custos e benefícios para as MB-BMB.

## APLICAÇÃO DE MISTURA BETUMINOSA ABERTA COM BETUME MODIFICADO COM ALTA INCORPORAÇÃO DE BORRACHA NA REABILITAÇÃO DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS

No Capítulo 4, “Estudo da aplicação de MB-BMB”, realiza-se a verificação da vida útil com o auxílio do *software BISAR 3.0*, em que para diferentes estruturas são calculados os valores das extensões de fadiga e de deformação permanente, de modo a determinar a sua vida útil.

No último capítulo, são apresentadas as principais conclusões do trabalho, bem como sugestões para trabalhos futuros.

No Anexo A, “Especificações de betumes”, estão as várias especificações de betumes de normas nacionais e internacionais e de fabricantes a actuar em Portugal.

No Anexo B, “Especificações de MB-BMB”, estão as especificações de duas misturas betuminosas modificadas com BMB utilizadas em Portugal.

No Anexo C, “Estudo da redução de ruído”, é apresentado um estudo comparativo do ruído provocado pelo contacto dos pneus com os pavimentos entre misturas convencionais e misturas modificadas com BMB.

## **2. Dimensionamento e reabilitação de pavimentos rodoviários flexíveis**

### **2.1 Considerações iniciais**

Neste capítulo faz-se uma revisão geral de conceitos básicos relacionados com a pavimentação rodoviária.

É descrita a estrutura dos vários tipos de pavimentos rodoviários, analisam-se os estados limites de ruína (fadiga e deformação permanente), assunto fundamental para compreender a degradação dos pavimentos rodoviários flexíveis e são estudados os ensaios mecânicos de desempenho para a avaliação das resistências à fadiga e à deformação permanente.

Ainda se demonstra como dimensionar novos pavimentos e desenvolve-se o conhecimento acerca das degradações que os afectam. Por fim, são apresentadas as técnicas de reabilitação, em especial, o dimensionamento de camadas de reforço.

### **2.2 Constituição e comportamento dos pavimentos rodoviários**

A principal função dos pavimentos rodoviários é assegurar uma superfície de rolamento que permita a circulação dos veículos com comodidade e segurança, durante um determinado período de tempo (Branco *et al.*, 2008). Um pavimento rodoviário é um sistema multi-estratificado constituído por várias camadas de espessura finita suportadas na fundação estabelecida pelo terreno natural.

APLICAÇÃO DE MISTURA BETUMINOSA ABERTA COM BETUME MODIFICADO COM ALTA INCORPORAÇÃO DE BORRACHA NA REABILITAÇÃO DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS

O pavimento é composto por dois tipos de camadas, as ligadas, formadas por materiais granulares estabilizados com ligantes e que constituem as camadas superiores, e as camadas não ligadas formadas por agregados e solo de fundação e que constituem as camadas inferiores.

Um pavimento rodoviário está sujeito a acções como o tráfego (pesado) e acções climáticas que vão desde as variações da temperatura até à água, como demonstrado na Figura 2-1.

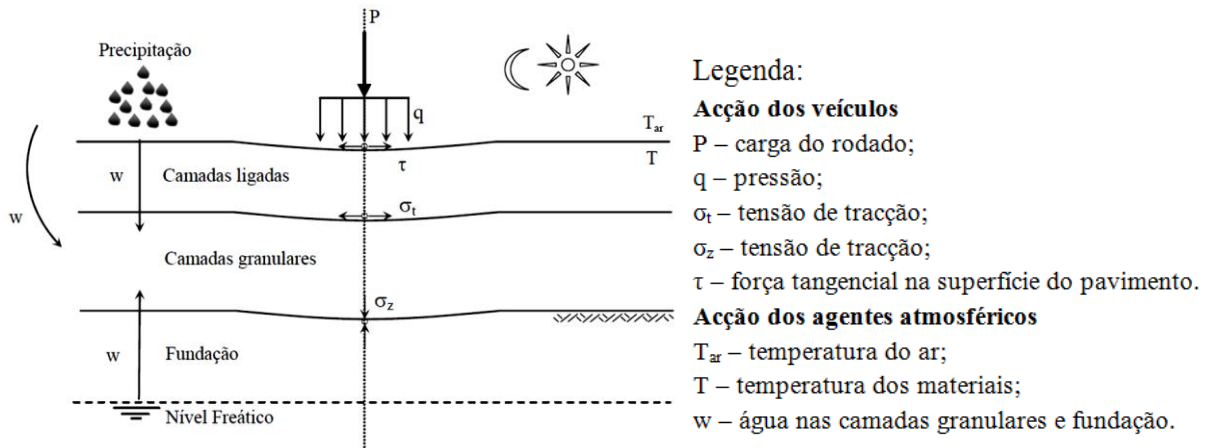


Figura 2-1: Constituição e acções dos pavimentos rodoviários (Branco *et al.*, 2008)

As duas famílias de diferentes materiais, ligados e não ligados, exibem comportamentos mecânicos distintos. As camadas ligadas devem resistir aos esforços de tracção, enquanto as camadas granulares têm de suportar os esforços de compressão (Vicente, 2006).

Na Figura 2-2 está ilustrado como os pavimentos rodoviários são compostos por várias camadas quanto à função que desempenham, para os pavimentos flexíveis e rígidos. Essas camadas são, em sentido descendente: camada de desgaste, camada de ligação<sup>1</sup>, base, sub-base e a fundação.

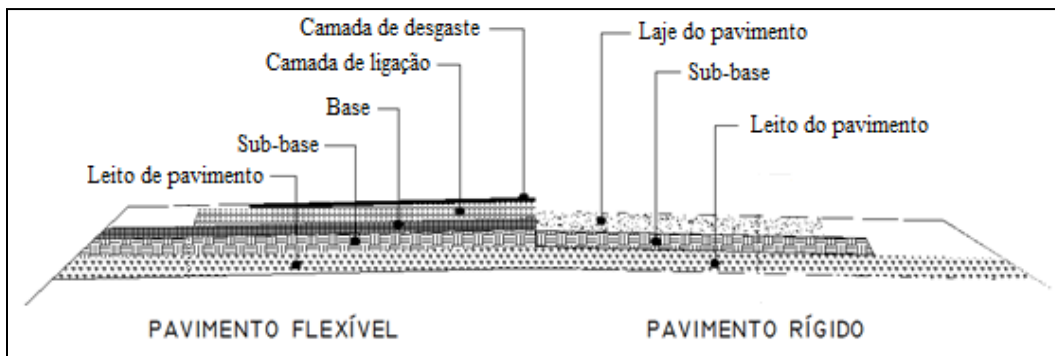


Figura 2-2: Estrutura em camadas dos pavimentos rodoviários

<sup>1</sup> Actualmente, "camada de ligação" é a designação utilizada da anteriormente chamada "camada de regularização".

## 2. Dimensionamento e reabilitação de pavimentos rodoviários flexíveis

A camada de desgaste assegura uma superfície que permite a circulação com conforto e segurança e impermeabiliza o pavimento. A seguir à camada de desgaste, existe o corpo do pavimento que é formado por várias camadas, enunciadas por ordem descendente: de ligação, de base e de sub-base. Estas camadas dispõem-se, normalmente, com qualidade e resistência decrescente, de forma descendente, em consonância com a progressiva redução dos esforços em profundidade.

O corpo do pavimento tem por principal responsabilidade a capacidade do pavimento em suportar as cargas de tráfego, podendo conter camadas estabilizadas com ligantes e também granulares. A camada de ligação tem um papel funcional e estrutural. É a superfície onde a camada de desgaste irá assentar e, como todas as camadas de um pavimento flexível, distribui as tensões. A camada de base é uma camada que assume particular importância. Tem um papel estrutural, distribuindo e reduzindo as tensões sobre a sub-base e o solo de fundação. Por isso, necessita normalmente de espessura elevada, de modo a cumprir a sua função. A camada de sub-base assegura o apoio da base e das camadas superiores, permite a adequada compactação da base, distribui as tensões, defende o solo de fundação do tráfego durante a execução da obra e tem ainda uma função drenante e anti-contaminante, protegendo as bases granulares da penetração de finos.

O leito do pavimento tem por objectivo servir de base de construção e permite a compactação das camadas de base e sub-base e a homogeneização das características resistentes da fundação. A fundação do pavimento é constituída pela camada de leito do pavimento e pelo terreno natural e serve de suporte ao pavimento. Caso este não tenha as características desejadas, é acrescentada uma camada de solo seleccionado com características melhores que as do solo existente.

De acordo com o tipo de materiais utilizados (ligante) e a deformabilidade, existem três tipos de pavimentos: os flexíveis, os rígidos e os semi-rígidos. No Quadro 2-1 indicam-se os materiais e o nível de deformabilidade para cada um dos três tipos de pavimentos rodoviários.

Quadro 2-1: Tipos de pavimentos, materiais e deformabilidade (Branco *et al.*, 2008)

Tipo de pavimento	Materiais (Ligante)	Deformabilidade
Flexível	Hidrocarbonetos e granulares	Elevada
Rígido	Hidráulicos e granulares	Muito reduzida
Semi-rígido	Hidrocarbonetos, hidráulicos e granulares	Reduzida

Os pavimentos flexíveis apresentam camadas superiores constituídas por misturas betuminosas compactadas e, imediatamente abaixo, uma ou duas camadas de material granular. Quanto à deformabilidade, este tipo de pavimento, em bom estado e sob a acção da carga de um eixo com a carga total de 130 kN (65 kN aplicados numa roda dupla), apresenta valores de deformação entre 250 e 500 µm.

APLICAÇÃO DE MISTURA BETUMINOSA ABERTA COM BETUME MODIFICADO COM ALTA INCORPORAÇÃO DE BORRACHA NA REABILITAÇÃO DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS

Os pavimentos rígidos apresentam uma camada superior formada por betão de cimento, e imediatamente a seguir e inferiormente, uma ou duas camadas formadas por material granular estabilizado por um ligante hidráulico (cimento), conhecido como betão pobre, e/ou apenas por material granular. Quanto à deformabilidade, este tipo de pavimento, apresenta valores inferiores de deformação da ordem dos 200  $\mu\text{m}$ .

Os pavimentos semi-rígidos são “uma mistura” dos dois pavimentos anteriormente mencionados: apresentam uma ou duas camadas superiores formadas por misturas betuminosas, e imediatamente abaixo, uma camada formada por material granular estabilizado por um ligante hidráulico, e pode ainda ter uma camada granular na sub-base. Quanto à deformabilidade, este tipo de pavimento, apresenta valores entre 200 e 400  $\mu\text{m}$ .

Na Figura 2-3 são apresentadas as duas estruturas de pavimentos flexíveis: à esquerda, de base granular e, à direita, de base betuminosa. Na Figura 2-4 apresenta-se a estrutura tipo dos pavimentos rígidos. Em cada camada, são indicadas exemplos de espessuras, dos materiais constituintes e das propriedades mecânicas: módulo de deformabilidade e coeficiente de Poisson.

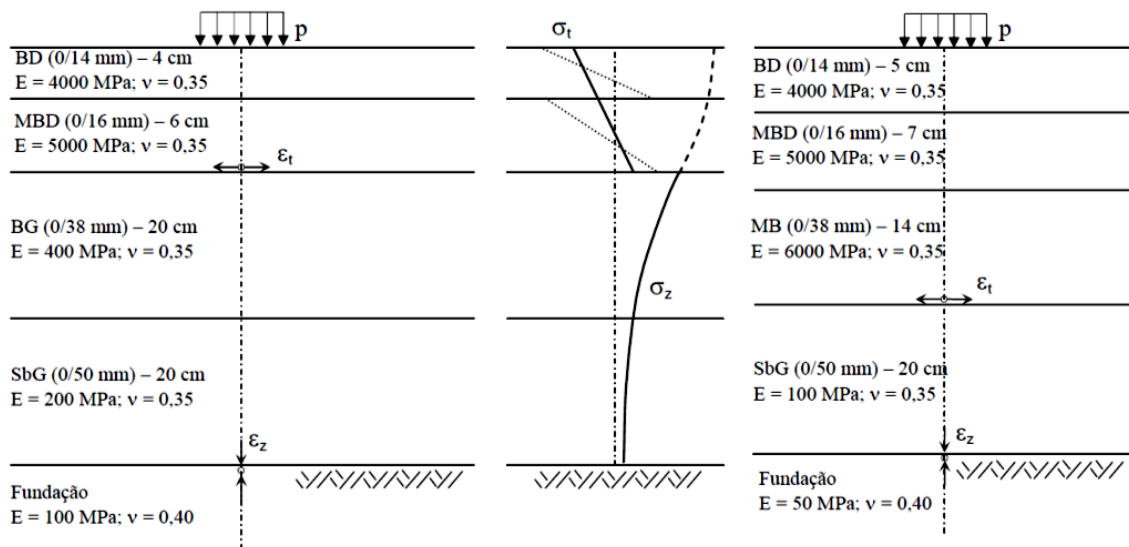


Figura 2-3: Constituição e comportamento dos pavimentos flexíveis (Branco *et al.*, 2008)

Legenda:

— Camadas coladas;

..... Camadas descoladas;

BD – Betão betuminoso em camada de desgaste;

MBD – Mistura betuminosa densa em camada de ligação;

MB – Macadame betuminoso em camada de base;

BG – Base granular;

SbG – Sub-base granular em material britado sem recomposição (*tout-venant*) ou com recomposição em central.

## 2. Dimensionamento e reabilitação de pavimentos rodoviários flexíveis

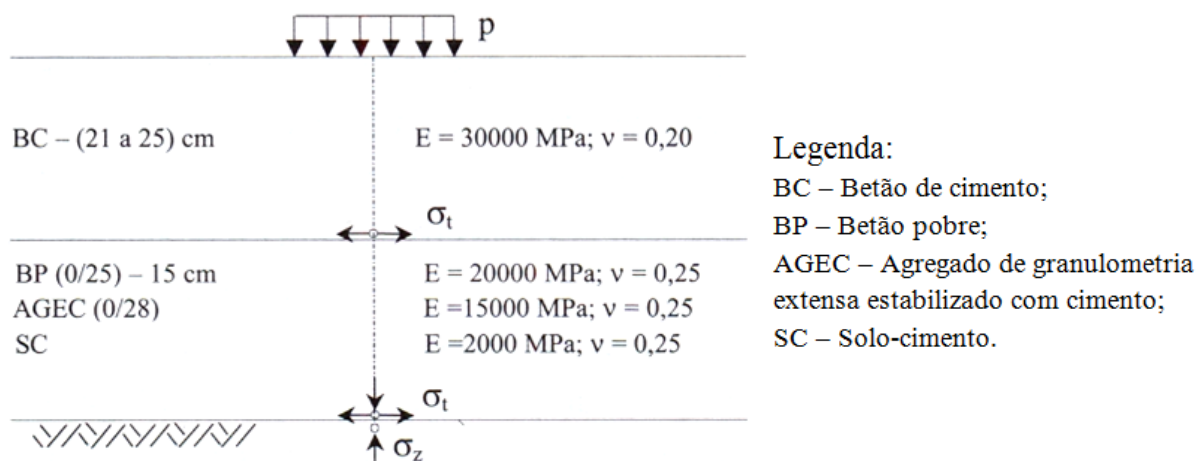


Figura 2-4: Constituição e comportamento dos pavimentos rígidos (Branco *et al.*, 2008)

A Figura 2-5 apresenta as duas estruturas de pavimentos semi-rígidos: à esquerda, a chamada estrutura directa e, à direita, a designada estrutura inversa. Nesta dissertação será dada especial atenção aos pavimentos flexíveis, visto que estes são de longe os mais utilizados na rede rodoviária nacional.

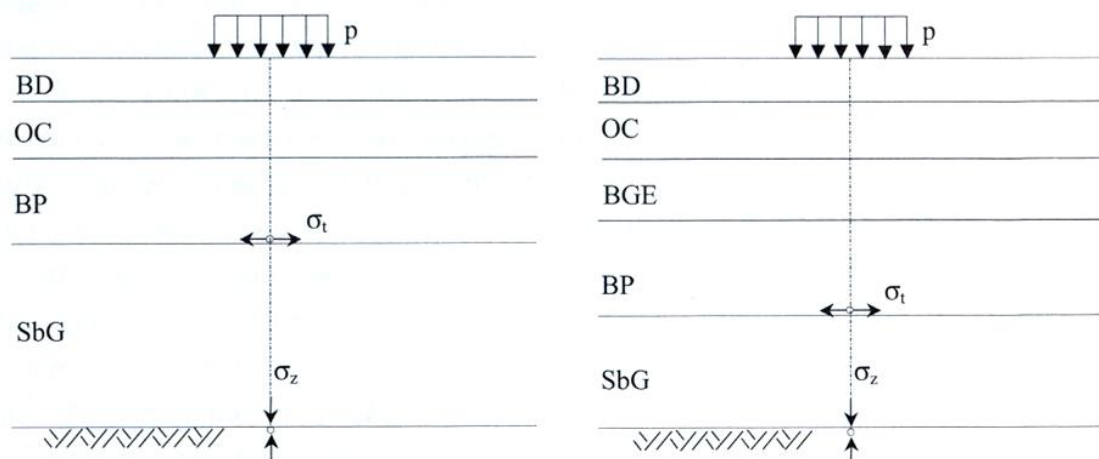


Figura 2-5: Constituição e comportamento dos pavimentos semi-rígidos (Branco *et al.*, 2008)

### Legenda:

BD – Betão betuminoso em camada de desgaste;

OC – Outras camadas betuminosas;

BP – Betão pobre;

BGE – Base granular de granulometria extensa;

SbG – Sub-base granular em material britado sem recomposição (*tout-venant*) ou com recomposição em central.

## 2.3 Dimensionamento de pavimentos flexíveis

A metodologia do dimensionamento dos pavimentos rodoviários evoluiu ao longo do século XX, mas a sua aplicação sempre se mostrou complexa, devido à variabilidade do tráfego, às condições climáticas, à dificuldade de caracterização mecânica dos materiais constituintes dos pavimentos, à complexidade dos modelos de comportamento, entre outros motivos.

O organograma da Figura 2-6 descreve, sucintamente, a metodologia habitualmente seguida no dimensionamento dos pavimentos rodoviários flexíveis.

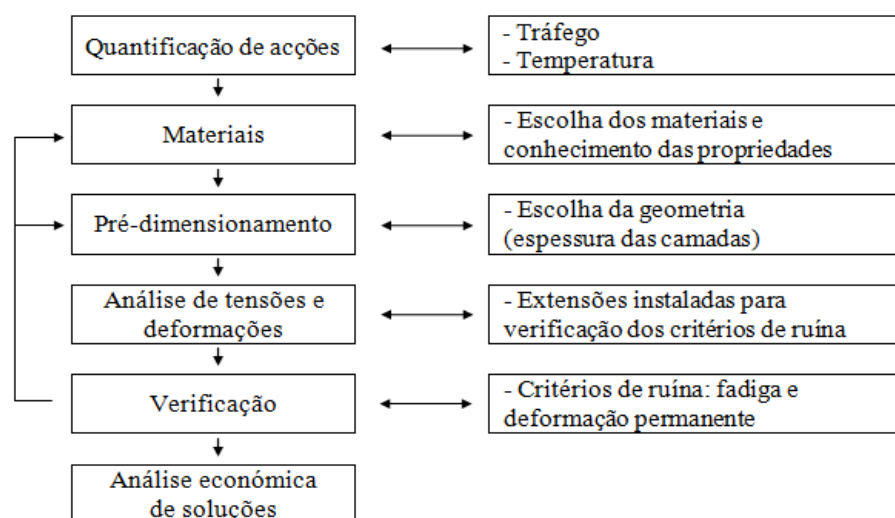


Figura 2-6: Organograma com o procedimento para dimensionamento de pavimentos flexíveis (Baptista, 1999)

O tráfego de pesados e as condições climáticas, principalmente a temperatura, são as acções mais importantes no dimensionamento estrutural de pavimentos. A acção da água não é contabilizada devido à impermeabilização do pavimento proporcionada pelas camadas betuminosas.

Realiza-se um pré-dimensionamento, de modo a conferir valores aproximados às espessuras das camadas betuminosas e granulares, através de catálogos. Nestes catálogos tipificam-se soluções tendo por base a quantificação de acções e os materiais escolhidos nos passos anteriores. Um dos métodos disponíveis em Portugal é o Manual de Concepção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional, adiante designado por MACOPAV (JAE, 1995). Outra alternativa é o método proposto por Baptista *et al.* (2002), aplicável aos pavimentos flexíveis de base betuminosa e de base granular.

A análise de tensões e deformações de um pavimento, também denominada de análise estrutural, tem por objectivo o cálculo do estado de tensão e deformação em alguns pontos da

estrutura, determinando o valor das duas extensões máximas de tracção e de compressão associadas aos critérios de ruína de fadiga e de deformação permanente, respectivamente.

Na verificação dos critérios de ruína, é determinado o número acumulado de eixos-padrão admissível, através das equações (2-5) e (2-7). Com a equação (2-3), obtém-se o dano, que deverá ser limitado a 100% para os dois critérios de ruína. Assim, se algum dos danos for superior a 100%, terá que se alterar a geometria da estrutura ou, em alternativa, seleccionar novos materiais.

A análise económica de soluções pretende determinar a solução óptima de dimensionamento em que o dano deverá ser de 100%. Para isso, pode escolher-se uma nova geometria ou a utilização de outros materiais. Ao existir várias soluções de dimensionamento, faz-se a análise económica das várias soluções determinadas.

## 2.4 Ensaios mecânicos de desempenho

### 2.4.1 Estudo da Resistência à Fadiga

A lei de fadiga define a relação entre a deformação ou tensão aplicada e o número de ciclos de aplicação de uma determinada carga até à ruptura.

Portanto, os pavimentos estão submetidos a um estado de tensão repetida provocada pela aplicação das cargas dos veículos, que se caracteriza pela fadiga das misturas betuminosas. A avaliação da resistência à fadiga de uma mistura betuminosa, necessária ao dimensionamento de pavimentos, deve ser realizada utilizando ensaios, que devem reproduzir, o melhor possível, as condições a que a mistura está submetida *in situ* (Silva, 2006).

Para a avaliação da resistência à fadiga, o ensaio mecânico de desempenho pode ser efectuado através de vários ensaios, com Fontes (2009) a destacar a flexão simples, a flexão alternada, a flexão em consola e a tracção directa. Neste estudo, será apenas estudada a flexão alternada em quatro pontos (com duas cargas e dois pontos de apoio), no qual são avaliadas misturas betuminosas, que no caso desta dissertação, consistem em misturas convencionais e misturas com betume modificado com borracha. Este tipo de ensaio simula o aparecimento de fendilhação por fadiga devido à formação de tracção que se desenvolve na face inferior dos provetes das camadas betuminosas.

O ensaio de fadiga é realizado, em extensão controlada, de acordo com a norma norte-americana AASHTO TP8-94: *Standard Test Method for Determining the Fatigue Life of Compacted Hot Mix Asphalt (HMA) Subjected to Repeated Flexural Bending*, embora já exista a EN 12697-24:2004 proposta pelo CEN.

## APLICAÇÃO DE MISTURA BETUMINOSA ABERTA COM BETUME MODIFICADO COM ALTA INCORPORAÇÃO DE BORRACHA NA REABILITAÇÃO DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS

Na pesquisa é utilizado um equipamento servo-hidráulico (Figura 2-7) constituído por uma estrutura de carga, um grupo hidráulico e uma câmara climática, que permite o controlo da temperatura entre  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ , com precisão de  $\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , durante todo o ensaio, dentro da qual se encontra um dispositivo que permite a realização de ensaios de flexão em 4 pontos (Figura 2-8).



Figura 2-7: Equipamento servo-hidráulico para a realização dos ensaios de flexão alternada (Fontes *et al.*, 2009)

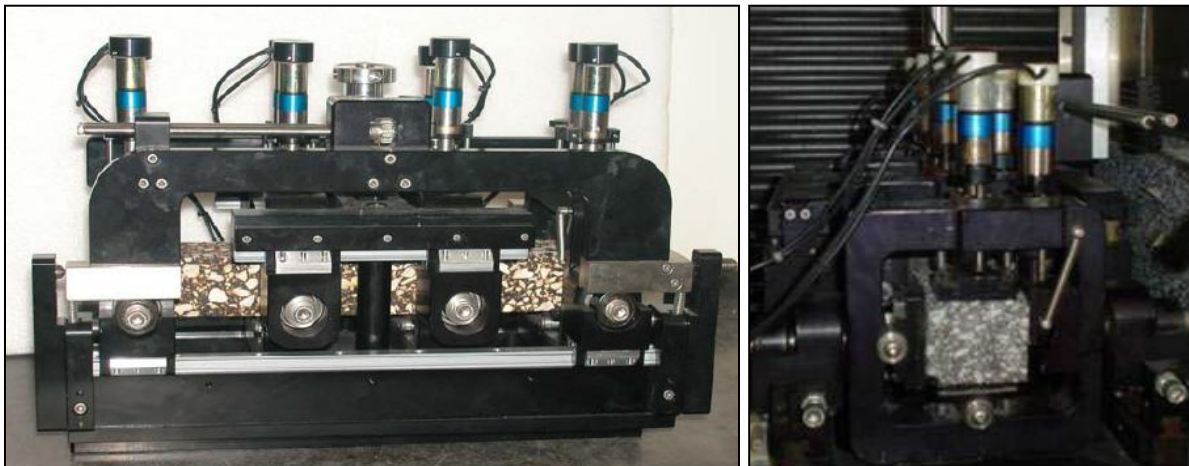


Figura 2-8: Dispositivo para realização de ensaios em flexão alternada em 4 pontos (Fontes *et al.*, 2007; Walubita *et al.*, 2005)

Uma carga de intensidade  $F_0$  é aplicada nos terços médios do provete, simplesmente apoiado nas extremidades, de modo a induzir na face inferior uma deformação específica de tracção inicial pré-definida. A configuração do teste está representada na Figura 2-9.

## 2. Dimensionamento e reabilitação de pavimentos rodoviários flexíveis

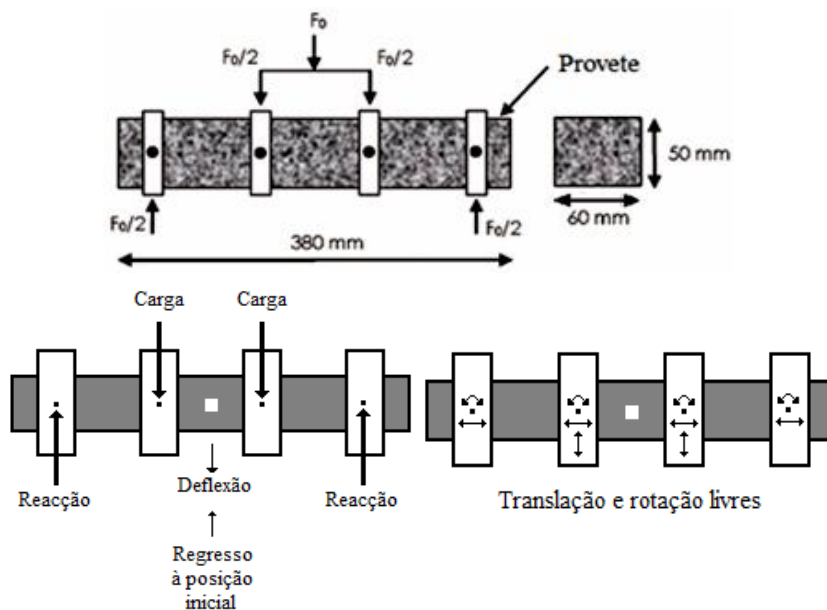


Figura 2-9: Representação esquemática da configuração de teste em quatro pontos (Pais *et al.*, 2007; Fontes, 2009)

Este dispositivo de ensaios em flexão permite testar provetes (amostras de vigas) até 50 mm x 63 mm x 380 mm.

Neste ensaio, uma carga é aplicada nos terços médios do provete, de modo a induzir uma extensão de tracção predefinida. Para a avaliação da vida de fadiga, são realizados testes com vários níveis, geralmente, entre  $100 \times 10^{-6}$  e  $1000 \times 10^{-6}$ . Nestes ensaios é de fundamental importância o controlo da temperatura e a frequência da aplicação do carregamento. Os ensaios são conduzidos em deformação controlada, à temperatura constante de 20 °C e com a aplicação de um carregamento repetido cíclico sinusoidal com uma frequência de 10 Hz.

De um modo geral, com a extensão controlada, a ruptura por fadiga é assumida que acontece quando se verifica um decréscimo de 50% do módulo de deformabilidade do provete inicial, obtendo-se uma série de pontos, que formam a curva de fadiga. A recta que melhor se ajusta a estes pontos, corresponde à lei de fadiga da mistura betuminosa.

Os resultados dos ensaios mecânicos de fadiga, para extensão controlada, são expressos através da equação (2-1) proposta por Monismith *et al.* (1971).

$$N = a \times \left( \frac{1}{\epsilon_t} \right)^b \quad (2-1)$$

Legenda:

N – Vida de fadiga expressa em número de solicitações de carga até à ruptura;

a, b – Coeficientes determinados experimentalmente;

$\epsilon_t$  – Extensão de tracção controlada ( $10^{-6}$ ).

## 2.4.2 Estudo da Resistência à Deformação Permanente

A formação de rodeiras nos pavimentos rodoviários desenvolve-se, gradualmente, a partir do número de aplicações de carga e aparece como depressões longitudinais sobre a trajectória do rodado acompanhado de pequenas elevações nas laterais. Segundo Sousa *et al.* (1994), as deformações permanentes são devidas a dois factores: à densificação da mistura devido à aplicação repetida das cargas dos veículos pesados (diminuição do volume à custa da redução do volume de vazios e re-arranjo do esqueleto sólido) e à acção das tensões de corte que ocorrem junto da superfície dos pavimentos.

Para avaliar a resistência à deformação permanente, o ensaio mecânico de desempenho pode ser efectuado através de vários ensaios, com Fontes (2009) a destacar os ensaios: de compressão simples, de compressão triaxial, de corte e com cargas rolantes. Neste estudo, será examinado, com maior incidência, o ensaio de corte simples a altura constante – RSST-CH (*Repeated Simple Shear Test at Constant Height*).

Ainda a citar para os ensaios com cargas rolantes em laboratório, o teste com *Wheel Tracking* realizado de acordo com a norma espanhola NLT-173/94 – *Resistencia a la Deformación Plástica de las Mezclas Betuminosas Mediante la Pista de Ensayo de Laboratorio*, embora já exista a EN 12697-22:2003 proposta pelo CEN. Neste ensaio, é medida a evolução da deformação ao longo de um intervalo de tempo e de uma temperatura definidos pelo utilizador. Para isso, é aplicado um carregamento constante através de uma roda durante um dado período de tempo, geralmente, de 120 minutos, a uma temperatura de 60 °C, no qual são registadas as temperaturas do ar no interior da câmara e da superfície do provete, as deformações verticais no centro do provete, nos minutos 1, 3 e 5, continuando a cada 5 minutos até completar os primeiros 45 minutos e a cada 15 minutos até finalizar os 120 minutos de duração do ensaio e o número de aplicações de carga (Freitas, 2004). Assim, com estes valores, através da implantação dos dados num gráfico, é possível fazer a comparação do comportamento à deformação permanente de várias misturas betuminosas e determinar as suas velocidades de deformação entre os 105 e os 120 minutos ( $V_{105-120}$ ).

O ensaio de corte simples a altura constante – RSST-CH, é realizado de acordo com a norma norte-americana AASHTO TP7-2001: *Standard Test Method for Determining the Permanent Deformation and Fatigue Cracking Characteristics of Hot Mix Asphalt (HMA) Using the Simple Shear Test (SST) Device*.

São utilizados provetes cilíndricos com 15 cm de diâmetro e 3,8 cm ou 5 cm de altura, dependendo da dimensão máxima do agregado. O ensaio é realizado a uma temperatura representativa da temperatura do pavimento a uma profundidade de 5 cm. Os provetes são colados aos pratos do equipamento, para evitar movimentos laterais que provocariam alterações de volume.

## 2. Dimensionamento e reabilitação de pavimentos rodoviários flexíveis

Nos pratos com os provetes são montados transdutores de deslocamentos na direcção horizontal, para medir o seu deslocamento relativo e obter a deformação de corte das misturas betuminosas (Fontes, 2009).

Durante o ensaio, um dos actuadores mantém-se estático enquanto o outro efectua movimentos horizontais pulsatórios. O actuador horizontal controla a magnitude das tensões de corte, enquanto o actuador vertical garante que o provete mantenha a altura constante durante o ensaio (Fontes, 2009). Na Figura 2-10 é apresentado o equipamento utilizado neste ensaio.



Figura 2-10: Equipamento com um provete para a realização do ensaio de corte simples a altura constante RSST-CH da Universidade do Minho (Fontes *et al.*, 2008)

O ensaio RSST-CH permite estabelecer uma lei de deformação permanente das misturas betuminosas em que há uma relação entre o número máximo de ciclos do eixo-padrão de 80 kN em função do número de ciclos de carga aplicados no ensaio, de modo a atingir uma rodeira máxima de 12,7 mm e uma deformação máxima de 0,4545, como apresentada na equação (2-2).

$$ESAL_{mrd} = 10^{\frac{4,36 + \log N_{mpss}}{1,24}} \quad (2-2)$$

Legenda:

$ESAL_{mrd}$  – número de ciclos do eixo-padrão de 80 kN para atingir a rodeira máxima de 12,7 mm;

$N_{mpss}$  – número de ciclos do ensaio RSST-CH para atingir a deformação máxima de 0,4545.

Os resultados do ensaio RSST-CH são expressos em termos do número de eixos-padrão de 80 kN (ESALs) necessários para produzir uma determinada profundidade de rodeira.

## 2.5 Critérios de ruína

Nesta secção descrevem-se os dois critérios de ruína principais do método da Shell (Figura 2-11) considerados no presente trabalho, para os pavimentos rodoviários flexíveis, e que são: o Critério de fadiga, em que ocorre o fendilhamento excessivo com início nas zonas mais traccionadas, associado à extensão horizontal de tracção ( $\epsilon_t$ ) que ocorre na base das camadas betuminosas; o Critério de deformação permanente, relacionado com a ocorrência de assentamento excessivo à superfície do pavimento e associado à extensão vertical de compressão ( $\epsilon_z$ ) no topo do solo de fundação.

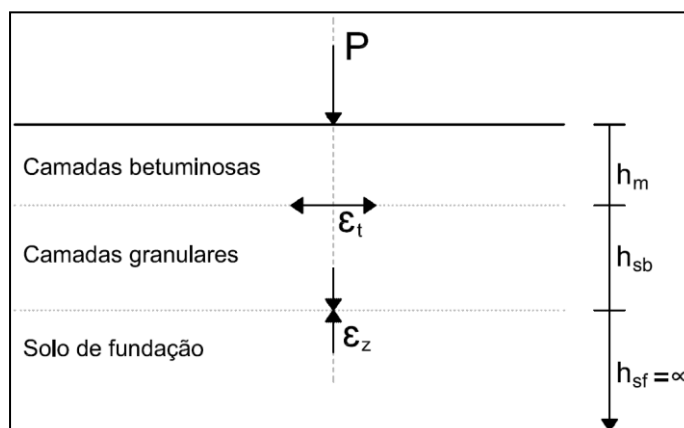


Figura 2-11: Extensões dos estados limites de ruína em pavimentos rodoviários flexíveis

A "Lei da Fadiga" relaciona o valor da extensão instalada num carregamento com o número de vezes que ela pode ser repetida até à ruína do material por fadiga. De forma semelhante, a "Lei da Deformação Permanente" associa a cada carregamento, que embora provoque apenas uma pequena deformação, a sucessiva aplicação de cargas que acarreta uma acumulação de deformações permanentes, provocando, assim, uma deformação permanente indesejada (Branco *et al.*, 2008). Assim, para cada estado limite de ruína existe um dano, calculado através da equação (2-3) e expresso habitualmente em percentagem.

$$D = \frac{N_p}{N_a} (\%) \quad (2-3)$$

Legenda:

D – dano (%);

$N_p$  – número acumulado de eixos-padrão que irão solicitar a estrutura durante a vida útil do pavimento;

$N_a$  – número acumulado de eixos-padrão admissível.

Ambos os danos assim calculados, os de fadiga e de deformação permanente, devem ser inferiores a 100%. Cada método de dimensionamento considera as respectivas leis de ruína ou dimensionamento. Porém, no presente trabalho consideraram-se apenas as leis do Método da Shell (Claessen *et al.*, 1977) por este ser o mais utilizado em Portugal.

### 2.5.1 Lei de Fadiga

A equação (2-4) traduz o critério de Fadiga do método da Shell.

$$\varepsilon_t = \frac{0,856 \times TVB + 1,08}{Em^{0,36} \times N_a^{0,20}} \quad (2-4)$$

A equação (2-4) pode ser escrita da seguinte forma:

$$N_a = \left( \frac{0,856 \times TVB + 1,08}{Em^{0,36} \times \varepsilon_t} \right)^5 \quad (2-5)$$

Legenda:

$N_a$  – Número acumulado de eixos-padrão admissível;

$\varepsilon_t$  – Extensão horizontal de tracção;

TVB – Teor volumétrico de betume (%);

Em – Módulo de deformabilidade da mistura betuminosa (Pa).

Para se aproximar à realidade, existem ainda ajustamentos necessários (Claessen *et al.*, 1977), que se multiplicam ao número acumulado de eixos-padrão de 80 kN determinado na equação (2-5) e são explicados a seguir:

- Factor de distribuição lateral dos rodados: factor igual a 2,5;
- Factor para levar em conta o repouso entre carregamentos e o tempo de recuperação da deformação: factor entre 1,25 (em misturas abertas e baixo teor em betume) a 10 (em misturas densas com grande teor em betume). Geralmente, considera-se o valor intermédio, factor igual a 5;
- Factor para atender aos gradientes de temperatura: factor igual a 1 (temperaturas normais) e 0,5 (temperaturas elevadas e/ou camadas de betão betuminoso espessas).

Segundo investigações de vários autores e entidades, como Monismith *et al.* (1971), Pell (1973), Monismith *et al.* (1981), SHRP (1994), no Quadro 2-2 são apresentados factores que afectam a resistência à fadiga dos pavimentos rodoviários.

Quadro 2-2: Factores que afectam a resistência à resistência das misturas betuminosas (adaptado de Fontes, 2009)

Factor	Mudança do factor	Efeito na resistência à fadiga
Granulometria do agregado	Aberta para fechada	Aumenta
Viscosidade do betume	Aumento	Aumenta
Rigidez do betume	Aumento	Aumenta
Percentagem de betume	Aumento	Aumenta
Porosidade da mistura	Aumento	Diminui

## 2.5.2 Lei de Deformação Permanente

A equação (2-6) quantifica o critério de Deformação Permanente.

$$\varepsilon_z = \frac{K1}{N_a^{0,25}} \quad (2-6)$$

A equação (2-6) pode ser escrita da seguinte forma:

$$N_a = \left(\frac{K1}{\varepsilon_z}\right)^4 \quad (2-7)$$

Legenda:

$N_a$  – Número acumulado de eixos-padrão admissível;

$\varepsilon_z$  – Extensão vertical de compressão;

$K1$  – Parâmetro que depende da probabilidade de sobrevivência atribuída no âmbito do dimensionamento do pavimento. Assume o valor de  $2,8 \times 10^{-2}$  para uma probabilidade de sobrevivência de 50%,  $2,1 \times 10^{-2}$  para 85% e  $1,8 \times 10^{-2}$  para 95%.

Sousa *et al.* (1991) investigaram uma variedade de factores que afectam a resistência à deformação permanente dos pavimento rodoviários, como apresentado no Quadro 2-3.

Quadro 2-3: Factores que afectam a resistência à deformação permanente das misturas betuminosas (adaptado de Sousa *et al.*, 1991)

Parâmetro	Factor	Mudança do factor	Efeito na resistência à deformação permanente
Agregado	Textura superficial	Lisa para rugosa	Aumenta
	Gradação	Descontínua para rugosa	Aumenta
	Forma	Redonda para angular	Aumenta
	Tamanho máximo	Aumento	Aumenta
Betume	Rigidez <sup>(1)</sup>	Aumento	Aumenta
Mistura	Percentagem de betume	Aumento	Diminui
	Volume de vazios <sup>(2)</sup>	Aumento	Diminui
	VMA	Aumento	Diminui <sup>(3)</sup>
Condições locais	Temperatura	Aumento	Diminui
	Estado de tensão/extensão	Aumento pressão contacto	Diminui
	Repetição de cargas	Aumento	Diminui
	Água	Seco para molhado	Diminui se a mistura for sensível à água

<sup>(1)</sup> Modificadores de ligante podem ser adicionados para aumentar a rigidez a temperaturas críticas, de modo a reduzir o potencial de deformação permanente;

<sup>(2)</sup> Quando o volume de vazios for inferior a 3%, o potencial de deformação permanente das misturas aumenta;

<sup>(3)</sup> É discutido que valores muito baixos de VMA (por exemplo, menor que 10%) devem ser evitados.

## 2.6 Degradações dos pavimentos rodoviários flexíveis

Os pavimentos rodoviários, ao estarem submetidos a acções dos veículos (tráfego pesado) e acções climáticas (variações de temperatura e água) e, possivelmente, conterem erros de projecto e construção e materiais inadequados, desenvolvem degradações que aumentam de extensão e, possivelmente, evoluem para outras degradações. Desta forma, o estudo das degradações e causas mais prováveis é importante para o estudo das condições de conservação do pavimento rodoviário.

Nos pavimentos rodoviários flexíveis, as degradações podem ser agrupadas nos seguintes grupos (Pereira *et al.*, 1999):

- a) Deformações;
- b) Fendilhamento;
- c) Desagregação da camada de desgaste;
- d) Movimento de materiais.

Cada família de degradações contém vários tipos de degradações, conforme indicado no Quadro 2-4.

Quadro 2-4: Famílias e tipos de degradações (Pereira *et al.*, 1999)

Família de degradações	Tipos de degradações		
Deformações	Abatimento	Longitudinal	Berma
			Eixo
		Transversal	
	Deformações localizadas		
	Ondulação		
	Rodeiras	Grande raio	
	Pequeno raio		
Fendilhamento	Fendas	Fadiga	
		Longitudinais	Eixo
			Berma
		Transversais	
	Parabólicas		
Pele de crocodilo	Malha fina		
	Malha larga		
Desagregação da camada de desgaste	Desagregação superficial		
	Cabeça de gato		
	Pelada		
	Ninhos ou covas		
Movimentação de materiais	Exsudação		
	Subida de finos		

Existe uma sequência e interação entre as várias famílias: a evolução do fendilhamento e/ou deformações provoca a desagregação da camada de desgaste e movimento de materiais, como descrito na Figura 2-12.



Figura 2-12: Sequência e interação das degradações (Pereira *et al.*, 1999)

Nas estradas da rede nacional portuguesa, as degradações mais relevantes são as deformações permanentes (rodeiras) e o fendilhamento. De seguida, são descritos os vários tipos de degradação das várias famílias, tomando como referência o descrito em Branco *et al.* (2008).

### 2.6.1 Deformações

O abatimento é uma deformação com uma expansão significativa, podendo apresentar-se na direcção longitudinal ou transversal. O abatimento longitudinal junto à berma é devido a uma redução da capacidade de suporte das camadas granulares e do solo de fundação. O abatimento longitudinal ao longo do eixo ocorre quando existe fendilhamento ao longo do eixo, devido a uma redução da capacidade de suporte por infiltração de água até às camadas inferiores granulares e ao solo de fundação. O abatimento transversal, localmente, depende de patologias nas camadas inferiores (solo de fundação e camadas granulares).

As deformações localizadas verificam-se numa pequena área, geralmente acompanhadas de rotura do pavimento.

A ondulação é uma deformação transversal que se repete com uma frequência ao longo do pavimento. Pode ter origem devido a deficiências na distribuição do ligante da camada de desgaste, ao arrastamento da mistura por deformação plástica excessiva causada pela acção do tráfego em camadas de betão betuminoso ou por deformação da fundação.

As rodeiras são deformações longitudinais, que se desenvolvem na banda de passagem dos pneus dos veículos, precisamente devido à passagem destes, podendo ser de pequeno ou grande raio.

### 2.6.2 Fendilhamento

Existe uma grande variedade de fendas. As fendas de fadiga do pavimento são isoladas, de sentido longitudinal, ramificadas, podendo ser fechadas ou abertas.

As fendas parabólicas aparecem na zona da passagem dos pneus e resultam de problemas de estabilidade da camada de desgaste e da sua ligação às camadas betuminosas inferiores. Este

tipo de fendas pode ser causada por ligação deficiente entre a camada de desgaste e a camada betuminosa inferior, condições severas de aplicação das cargas, acções climáticas desfavoráveis e espessura e resistência reduzidas da camada de desgaste. Podem desenvolver-se até a formação de peladas.

O fendilhamento com origem à superfície inicia-se na superfície do pavimento e progride em profundidade, sem atingir a base das camadas betuminosas. Pode ter origem em deficiências do processo construtivo como na deficiente compactação e segregação das misturas betuminosas e na agressividade do tráfego pesado, juntamente com temperaturas elevadas, possivelmente, origina deformações elevadas, iniciando fendilhamento com origem à superfície.

A pele de crocodilo resulta da evolução das fendas ramificadas, que passam a formar uma malha com fendas. Quanto mais fendilhadas estiverem as camadas betuminosas do pavimento, mais severa será a acção das cargas. A pele de crocodilo pode classificar-se, quanto ao tamanho do lado da malha, em malha fina ou estreita se o lado da malha for igual ou inferior a 40 cm e malha larga se o lado for superior a 40 cm.

Pode ter como causas, o fenómeno da fadiga, a acção das condições climáticas, mais concretamente, temperaturas muito reduzidas, a deficiente qualidade das misturas betuminosas e o solo de fundação com reduzida capacidade de suporte.

### **2.6.3 Desagregação da camada de desgaste**

A desagregação superficial resulta do desprendimento dos agregados grossos, em parte devido à evolução da fendilhação e, também, da deficiente ligação ou falta de estabilidade dessa ligação entre os diferentes componentes da mistura betuminosa. Pode ainda ter variadíssimas causas, como as deficiências na qualidade dos materiais, as deficiências na execução da camada de desgaste, a segregação dos inertes em central, durante o transporte ou na sua colocação, um betume deficiente, a presença de água e condições desfavoráveis na fase de execução.

A cabeça de gato é a perda da componente mais fina da mistura betuminosa (filler, finos e ligante betuminoso), em que os agregados grossos ficam mais salientes, aumentando a macrotextura da superfície. Pode ter origem numa deficiente qualidade dos materiais constituintes e da mistura, numa deficiente dosagem em ligante ou em condições severas de tráfego, com acções tangenciais muito elevadas como descidas acentuadas e curvas de raio reduzido.

A pelada também conhecida como descamação, é um desprendimento de pequenas placas da camada de desgaste da camada inferior. Pode ter como origem a espessura reduzida da

camada de desgaste, uma deficiente ligação entre a camada de desgaste e a camada seguinte ou a falta de estabilidade da camada de desgaste.

Os ninhos também conhecidos como covas, podem surgir como a evolução da pele de crocodilo devido à desagregação dos bordos das fendas ou das cabeças de gato. Podem ter outras causas, como uma zona localizada com capacidade de suporte deficiente ou um defeito como a má qualidade ou a colocação localizada nas camadas de desgaste ou de base.

Os ninhos infligem efeitos severos sobre os veículos, aumentando a evolução da degradação do pavimento.

#### **2.6.4 Movimento de materiais**

A exsudação é resultante da alteração da composição da camada de desgaste, em que o excesso do ligante sobe até à superfície, envolvendo os agregados grossos e a redução da macrotextura.

Tem origem em deficiências na formulação da camada de desgaste como excesso de ligante, ligante de reduzida viscosidade e excesso da fracção fina dos agregados, juntamente com condições severas de tráfego como tráfego pesado e lento e acções climáticas desfavoráveis como temperaturas elevadas.

A subida de finos também conhecida como bombagem de finos, ocorre quando as camadas betuminosas de um pavimento estão fendilhadas e, ao mesmo tempo, existe um nível freático muito elevado devido às acções climáticas e às condições de drenagem. Assim, com a presença de água no interior do pavimento ou no solo de fundação e a compressão exercida no pavimento devida ao tráfego, a água aprisionada é expulsa para a superfície através das fendas existentes no pavimentos. Com esta água, são transportados finos das camadas atravessadas.

### **2.7 Reabilitação de pavimentos flexíveis**

As condições de um pavimento podem ser descritas através de vários indicadores, que se associam a dois grupos principais: as características superficiais e as características estruturais; os dois tipos de características estão intimamente interligados.

Com a necessidade de melhorar, reabilitar e conservar os pavimentos existentes, desenvolveram-se técnicas para tal, existindo a conservação funcional e a conservação estrutural.

### 2.7.1 Reabilitação das características superficiais

As características superficiais de um pavimento dizem respeito às suas características funcionais, como a rugosidade que influencia a segurança e a regularidade longitudinal e transversal que condiciona o conforto. Existem, ainda, outras características como a drenabilidade e as qualidades ópticas como a cor e o poder reflector. Outras finalidades podem ser atingidas, como a redução de ruído e a impermeabilização da camada de desgaste.

Então para reabilitar as características superficiais dos pavimentos flexíveis é necessário fazer alterações ao nível da camada de desgaste, pois é nesse local, que vão actuar as técnicas de reabilitação. Para a aplicação destas técnicas, é necessário que os pavimentos estejam em boas condições estruturais.

De acordo com Branco *et al.* (2008), das técnicas existentes para a reabilitação das características superficiais, as mais conhecidas e utilizadas em Portugal, são as seguintes:

*Revestimentos betuminosos superficiais*, constituídos por camadas de desgaste delgadas, resultantes da sobreposição de uma ou mais camadas de ligante betuminoso e de agregado, de forma alternada, sobre o pavimento existente. Esta solução pode ser utilizada em diferentes combinações de camadas de agregado e betume.

*Microaglomerado betuminoso a frio*, constituído por uma mistura betuminosa a frio com emulsão betuminosa, geralmente modificada, realizada *in situ* e depois espalhada sobre o pavimento no estado fluido e numa camada muito delgada.

*Lama asfáltica*, também conhecida por *Slurry Seal*, é semelhante ao microaglomerado betuminoso a frio, tendo como única diferença o facto de ter uma menor dimensão dos agregados.

*Microbetão betuminoso rugoso*, constituído por uma mistura em camada delgada que aumenta bastante a rugosidade e, conseqüentemente, melhora a segurança e reduz o ruído, com piso molhado.

*Argamassa betuminosa*, formando uma mistura utilizada em condições de pouco tráfego e para retardar o aparecimento de fendilhamento.

Existem ainda outras técnicas como o *betão betuminoso muito delgado*, o *betão betuminoso drenante* e a termorregeneração, esta última pouco utilizada em Portugal.

Para além das técnicas já mencionadas, recorrem-se a outras técnicas complementares, como por exemplo: a ranhuragem do pavimento, de modo a auxiliar o escoamento das águas; a

selagem de fendas dos pavimentos, para impedir a penetração de água e elementos estranhos; as reparações localizadas, a executar em pavimentos com um número reduzido de patologias e estas aconteçam em locais pontuais e isolados.

### 2.7.2 Reabilitação das características estruturais

As características estruturais de um pavimento correspondem à sua capacidade de carga, segundo Antunes (1993), ou seja, a capacidade do pavimento para suportar as acções devidas ao tráfego.

A Figura 2-13 apresenta um gráfico com a evolução do estado do pavimento ao longo do tempo e os efeitos resultantes das medidas de conservação e/ou reabilitação.

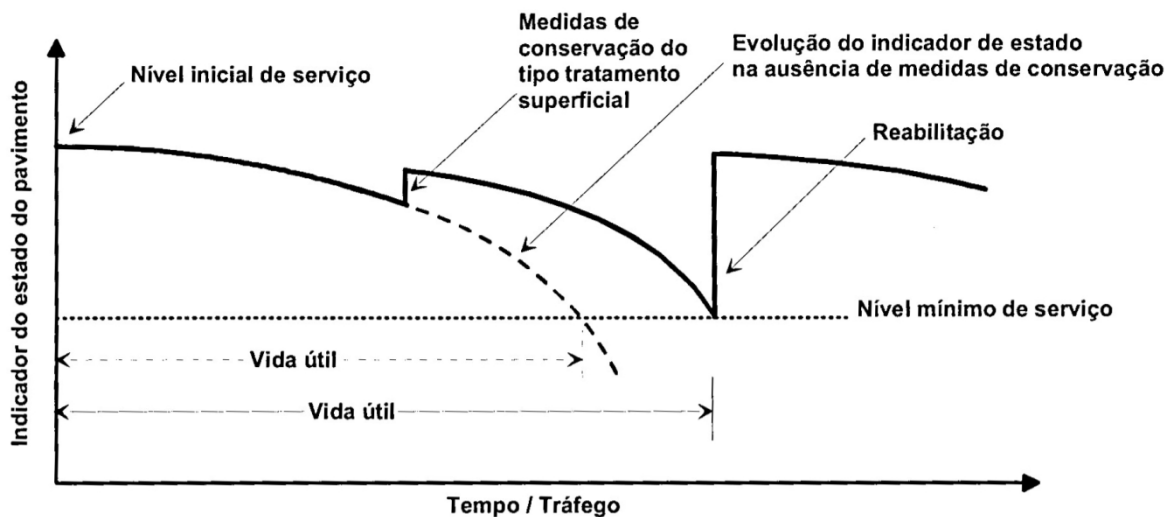


Figura 2-13: Evolução do estado do pavimento ao longo do tempo (Batista, 2004)

Na reabilitação das características estruturais dos pavimentos, são executadas uma ou mais camadas (desgaste, ligação e base) e, possivelmente, outros trabalhos complementares.

Uma das principais medidas é o reforço com misturas betuminosas a quente, com o objectivo de aumentar a capacidade estrutural do pavimento existente. Os reforços consistem na aplicação de camadas betuminosas sobre o pavimento existente, no caso dos pavimentos pouco degradados, após a realização de pequenos trabalhos de reparação como selagem de fendas, tapagem das covas, melhoramento da drenagem, entre outros. Para os pavimentos muito degradados, é frequente recorrer-se à fresagem das camadas mais degradadas, à reparação posterior da camada remanescente e, por último, a execução das novas camadas de reforço.

Existem ainda várias técnicas de reciclagem de materiais fresados do pavimento, que consistem na reutilização dos materiais provenientes dos pavimentos antigos, como matéria-prima, na produção de misturas betuminosas.

### **2.8 Dimensionamento da camada de reforço de pavimentos flexíveis**

Nesta secção vai demonstrar-se como determinar a espessura da camada de reforço de um pavimento rodoviário flexível, como medida de reabilitação, para aumentar a sua vida útil restante em eixos-padrão.

A reabilitação diz respeito às intervenções com o objectivo de promover uma melhoria das características face a novas solicitações para um novo período de vida.

Para o dimensionamento do reforço de pavimentos rodoviários será utilizado um método conhecido como "Procedimento Baseado nas Deflexões Reversíveis" uma vez que este é o método mais utilizado em Portugal. Existe ainda outro método denominado por "Procedimento Baseado nas Espessuras Efectivas" (AI,1983), que não será desenvolvido neste estudo.

O Método das Deflexões Reversíveis foi desenvolvido e aplicado pelo LNEC no final dos anos 60 (Pereira, 1971), sofrendo alterações desde então, através do desenvolvimento dos meios de cálculo, dos modelos de comportamento e dos métodos de avaliação de carga.

O procedimento é dividido em duas fases. Numa primeira fase, é necessário realizar ensaios para assim analisar a capacidade de carga do pavimento a reforçar e, finalmente, fazer os cálculos para determinar a espessura da camada de reforço.

Na Figura 2-14, através de um esquema, é descrita a metodologia do processo de análise do estado de conservação e reabilitação do pavimento através de um organograma (Murtinheira, 2011).

APLICAÇÃO DE MISTURA BETUMINOSA ABERTA COM BETUME MODIFICADO COM ALTA INCORPORAÇÃO DE BORRACHA NA REABILITAÇÃO DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS

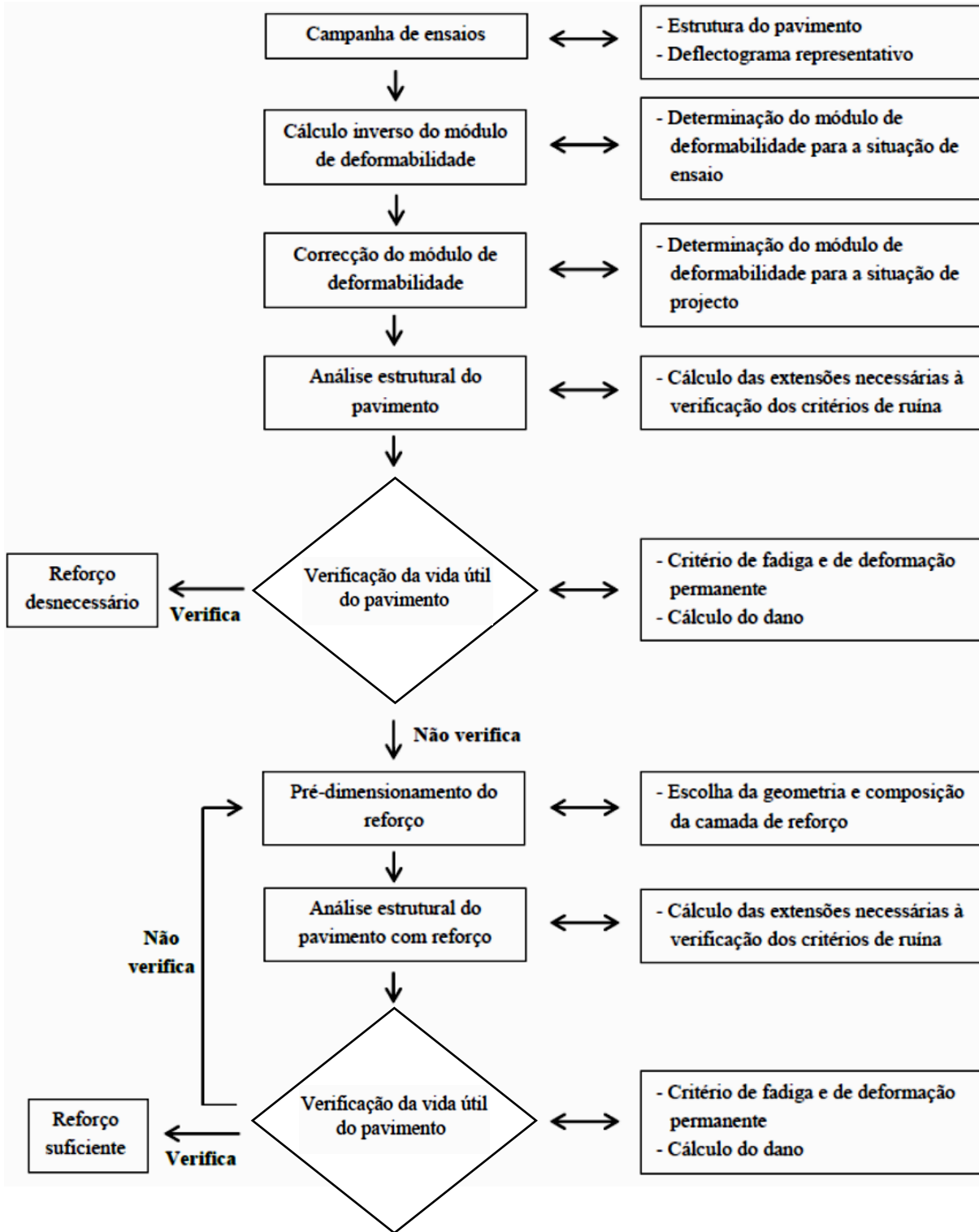


Figura 2-14: Metodologia de análise do estado de conservação e reabilitação de pavimentos flexíveis (adaptado de Murtinheira, 2011)

Assim, será feita uma descrição mais aprofundada do Método das Deflexões Reversíveis.

## 2. Dimensionamento e reabilitação de pavimentos rodoviários flexíveis

1) São realizados ensaios de carga no pavimento flexível da estrada, possivelmente, em toda a sua extensão. Para a determinação da capacidade de carga, o aparelho mais utilizado é o deflectómetro de impacto (FWD – *Falling Weight Deflectometer*). O deflectómetro de impacto é um equipamento que avalia a capacidade estrutural de um pavimento através da sua resposta a uma carga de impacto. Este equipamento está montado num reboque. Para medir a resposta da superfície, o reboque suporta vários acelerómetros a determinadas distâncias do centro de aplicação da carga, alinhados na direcção do eixo do reboque.

O ensaio realiza-se com a queda da massa de uma certa altura sobre os amortecedores, transmitindo uma força ao pavimento através da placa rígida, sendo ao mesmo tempo medidos os deslocamentos verticais da superfície nos pontos de apoio dos acelerómetros.

De acordo com Branco *et al.* (2008), a realização destes ensaios deverá obedecer a uma conjunto de orientações, descritas a seguir:

- a) os locais a serem analisados devem situar-se nas rodeiras externas, em cada sentido de circulação e ser espaçados no máximo 100 metros;
- b) para pavimentos flexíveis de grande espessura (superior a 15 cm) de camadas betuminosas, os ensaios devem ser realizados na época mais desfavorável - Verão; nos pavimentos flexíveis com espessura pequena de camadas betuminosas, a época ideal é logo a seguir à época das chuvas - Inverno ou Primavera;
- c) registo da temperatura à superfície do pavimento e da temperatura do ar;
- d) deve ser feito o registo se o local a ensaiar se situa em aterro ou escavação e também o registo da classe de fendilhação;
- e) deve proceder-se à recolha de amostras do pavimento para uma melhor caracterização da estrutura a ensaiar.

Deverão ser recolhidas as informações dadas pelo ensaio, mais concretamente, os valores das deflexões e respectivas distâncias ao ponto de carga, para cada troço.

2) É necessário tratar estatisticamente os dados recolhidos. Para cada troço e para cada profundidade obter o percentil 85 da deflexão. Identificar o deflectograma real que mais se aproxima das deflexões observadas. A seguir, obter a altura do pavimento para esse local de observação e considerar homogéneo para toda a estrada.

3) Recorrer a um programa de cálculo do estado de tensão-deformação, e.g. *BISAR 3.0* ou *ELSYM5*, para modelar o pavimento existente e simular as condições de aplicação de carga, arbitrando valores para os módulos de deformabilidade das várias camadas. Quando o deflectograma calculado for semelhante ao deflectograma real, assume-se a característica mecânica principal, o módulo de deformabilidade do modelo encontrado.

4) Para se avaliar a capacidade resistente do pavimento, é necessário corrigir os módulos de deformabilidade das camadas betuminosas, de modo a que correspondam à temperatura de serviço e não à temperatura a que se fez o ensaio.

5) Conhecida a estrutura do pavimento existente, determinam-se as extensões com a ajuda de um *software* de cálculo automático, estima-se a vida restante do pavimento, em eixos-padrão, através dos critérios de fadiga e deformação permanente, por um método de dimensionamento, como o Método da Shell (Claessen *et al.*, 1977) ou o Método da Universidade de Nottingham (Brown *et al.*, 1977). Calcula-se o dano para os dois critérios e, se algum deles for superior a 100%, é necessária a execução da camada de reforço.

6) Sabendo o módulo de deformabilidade da nova camada de reforço, escolhe-se uma determinada espessura, realizando-se assim o dimensionamento do reforço. Determinam-se as extensões com a ajuda de um *software* de cálculo automático, estima-se a vida restante do pavimento, em eixos-padrão, através dos critérios de fadiga e deformação permanente. Calcula-se o dano para os dois critérios e, se o dano mais elevado se situar entre os 80 e 100%, a camada de reforço é suficiente.

## 2.9 Considerações finais

Este capítulo centrou-se numa revisão geral sobre a pavimentação rodoviária.

Realizou-se uma descrição dos vários tipos de pavimentos rodoviários, descrevendo-se as suas camadas constituintes.

Estudaram-se os estados limites de ruína (fadiga e deformação permanente), de modo a compreender-se a degradação dos pavimentos rodoviários flexíveis. Por fim, foram estudados os ensaios mecânicos de desempenho para a avaliação das resistências à fadiga e à deformação permanente.

Estudou-se a metodologia do dimensionamento de novos pavimentos flexíveis. Descreveram-se as diversas degradações dos pavimentos rodoviários flexíveis e as técnicas de reabilitação de pavimentos flexíveis tanto das características superficiais como das estruturais. Analisou-se o dimensionamento de camadas de reforço para pavimentos flexíveis.

## **3. Misturas Betuminosas com Betume Modificado com Borracha (MB-BMB)**

### **3.1 Considerações iniciais**

Neste capítulo apresenta-se uma revisão bibliográfica sobre as Misturas Betuminosas com Betume Modificado com Borracha (MB-BMB). Nesta revisão, que se entende como fundamental atendendo ao tema do presente trabalho, começa-se por estudar os materiais de base que integram o Betume Modificado com Borracha (BMB), o betume e o granulado de borracha.

De seguida, faz-se uma resenha histórica das misturas betuminosas modificadas, dando particular destaque às MB-BMB. Aborda-se também o tema do BMB, dando enfoque às suas características, aos seus processos de fabrico, às vantagens e desvantagens da sua utilização, aos diversos tipos de MB-BMB existentes, incluindo a variante das camadas selantes. Por fim, são referidas as principais aplicações em Portugal de MB-BMB, a evolução da sua utilização a nível nacional e a relação entre custos e benefícios.

### **3.2 Materiais integrantes do Betume Modificado com Borracha**

#### **3.2.1 Betume**

Existem vários ligantes betuminosos, como o betume asfáltico, o asfalto e o alcatrão e, ainda, os ligantes hidráulicos, como o cimento. Dos vários ligantes existentes, utilizados na pavimentação rodoviária, o mais usado em Portugal é de longe o betume asfáltico. Desta

## APLICAÇÃO DE MISTURA BETUMINOSA ABERTA COM BETUME MODIFICADO COM ALTA INCORPORAÇÃO DE BORRACHA NA REABILITAÇÃO DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS

forma, apresenta-se a seguir uma descrição mais detalhada sobre este material. Os termos asfalto e betume são frequentemente utilizados indiferentemente para designar a forma natural e manufacturado da substância, respectivamente. Mas o betume não deve ser confundido com asfalto (que é uma mistura de minerais e betume) ou alcatrão (obtidos a partir da destilação destrutiva de carvão e é quimicamente diferente). De referir que a origem do termo betume vem da palavra do latim *bitūmen*. O nome grego para a substância era *ásphaltos*.

O betume é um ligante betuminoso composto por uma mistura de líquidos orgânicos, que é altamente viscoso, escuro, pegajoso, totalmente solúvel em sulfeto de carbono e composto principalmente por hidrocarbonetos aromáticos policíclicos altamente condensados. O betume é a fracção residual (inferior) resultante da destilação fraccionada do petróleo bruto (Figura 3-1) que contém uma complexa variedade de hidrocarbonetos, com diferentes massas moleculares.

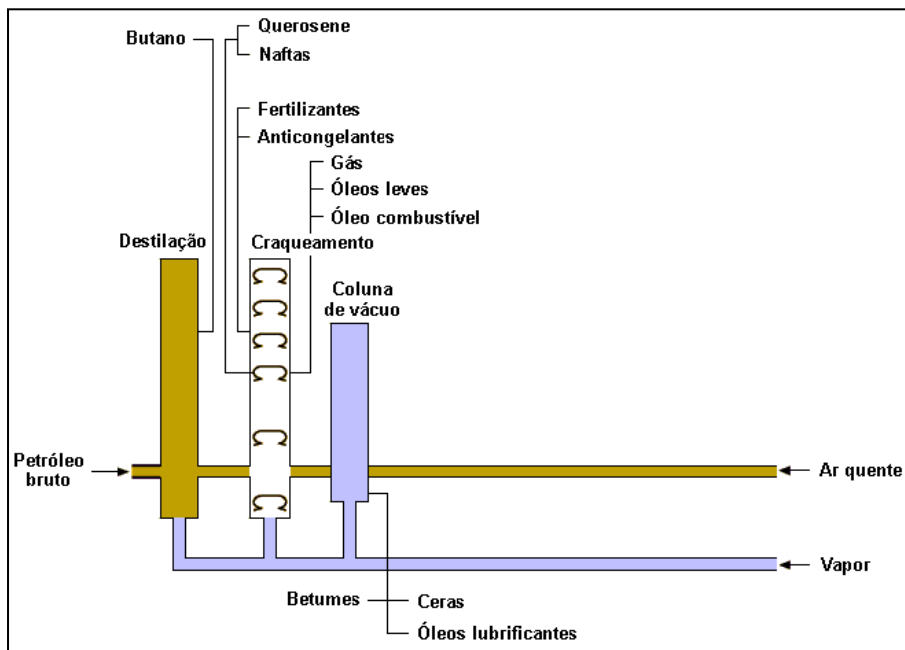


Figura 3-1: Destilação fraccionada do petróleo bruto (adaptado de Lombardi, 1993)

No primeiro passo, através dum processo de destilação atmosférica, as fracções mais leves do petróleo bruto passam ao estado gasoso, enquanto as fracções mais pesadas se depositam no fundo da torre sob a forma de resíduo sendo extraídas. Este resíduo é denominado "primeiro resíduo" ou "resíduo bruto".

Na fase seguinte, recorrendo a destilação no vácuo, o primeiro resíduo é aquecido a uma temperatura entre 350 °C e 400 °C e enviado para uma coluna com uma pressão negativa entre 10 e 100 mm de mercúrio. Esta pressão negativa permite a separação física dos constituintes evitando a degradação térmica, resultando num segundo resíduo, que é usado na produção dos diferentes betumes asfálticos (Lombardi, 1993).

### 3. Misturas Betuminosas com Betume Modificado com Borracha (MB-BMB)

O betume é formado por hidrocarbonetos saturados de peso molecular elevado (Quadro 3-1) e contém em média 80 a 85% de carbono, 10 a 15% de hidrogénio e 2 a 3% de oxigénio. A maioria dos betumes ainda contém pequenas quantidades de enxofre e azoto, vários metais pesados como o níquel, o vanádio, o chumbo, o cromo, o mercúrio, o arsénico e o selénio e outros elementos tóxicos.

Quadro 3-1: Produtos obtidos na destilação do petróleo (Petróleo e Gás, 2011)

Produto	Quantidade de carbonos	Ponto de ebulição de referência (°C)
Gás de petróleo	1 a 4 C	20
Gasolina	5 a 10 C	120
Querosene	10 a 16 C	170
Gasóleo	14 a 20 C	270
Óleo lubrificante	20 a 50 C	340
Óleo combustível	20 a 70 C	500
Betume	superior a 70 C	600

Os betumes têm diferentes composições dependentes do petróleo bruto destilado e do processo de produção. Embora tenham baixa reactividade química a muitos agentes, podem sofrer alterações devidas ao processo de envelhecimento que ocorre em consequência da oxidação lenta provocada pelo oxigénio atmosférico e pela água das chuvas.

Os betumes apresentam uma composição química bastante complexa. Fazer uma análise minuciosa, além de ser muito trabalhoso e dispendioso, geraria demasiada informação para se determinar as propriedades do betume. Assim, os betumes podem separar-se em dois grupos químicos principais: asfaltenos e maltenos. Os maltenos ainda podem ser divididos em três subgrupos: saturados, aromáticos e resinas.

Os asfaltenos são sólidos amorfos, de cor preta e castanha e, para além de grandes percentagens de carbono e hidrogénio, contêm azoto, enxofre e nitrogénio. Constituinte 5 a 25% dos betumes, a quantidade de asfaltenos influencia as características reológicas do betume, quanto maior for a quantidade de asfaltenos mais duro será o betume.

Os saturados são óleos viscosos não polarizados de cor branca ou creme. São constituídos por hidrocarbonetos asfálticos maioritariamente leves e constituem 5 a 20% do betume. Os aromáticos, que são líquidos viscosos de cor castanha escura, constituem 40 a 65% do betume. Neste grupo, estão incluídos os componentes aromáticos nafténicos, que fazem parte do betume de peso molecular mais baixo e desempenham a maior proporção do meio dispersante dos asfaltenos.

## APLICAÇÃO DE MISTURA BETUMINOSA ABERTA COM BETUME MODIFICADO COM ALTA INCORPORAÇÃO DE BORRACHA NA REABILITAÇÃO DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS

As resinas são sólidas ou semi-sólidas, de cor castanha escura e muito polarizadas, tornando-as muito adesivas. Têm uma composição química semelhante à dos asfaltenos e funcionam como agentes dispersantes dos asfaltenos.

Em suma, o betume é considerado um sistema coloidal em que micelas de elevado peso molecular (asfaltenos) estão dispersas num meio contínuo, oleoso e de menor peso molecular (maltenos), como ilustrado no modelo de micelas de Yen (Figura 3-2).

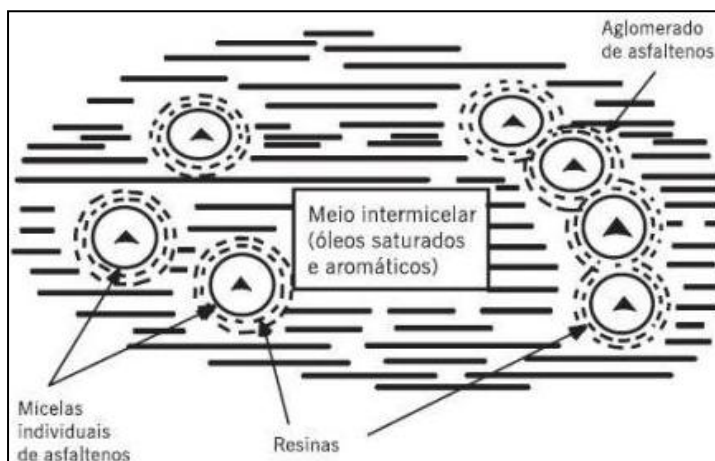


Figura 3-2: Modelo de micelas de Yen (IME, 2011)

Os betumes de pavimentação apresentam uma reologia que depende da temperatura e do tempo. Desta forma, para que se possa prever o comportamento dos betumes, é necessário estabelecer padrões que permitam avaliar as suas características. Os betumes ao respeitarem os critérios estabelecidos pelas especificações aplicáveis permitem prever o seu comportamento.

Em Portugal, a especificação LNEC E 80 (1997): *Betumes e Ligantes Betuminosos de Pavimentação - Classificação, Propriedades e Exigências de Conformidade*, considera alguns dos aspectos preconizados pelo Projecto de Norma Europeia prEN 12591:1996 *Betumes e ligantes betuminosos - Especificações para betumes de pavimentação* (entretanto substituída pela EN 12591:2009), como apresentado no Quadro 3-2.

Em Portugal, a classificação dos betumes advém do valor da penetração a 25 °C. Desta forma, existem os seguintes tipos de betume: 10/20, 20/30, 35/50, 50/70, 70/100, 100/150, 160/220 e 250/330. As exigências de conformidade para cada tipo de betume de pavimentação encontram-se no documento normativo do LNEC (Quadro A-1 do Anexo A).

As duas propriedades mais importantes na caracterização de betumes de pavimentação são a penetração e a temperatura de amolecimento, as quais são determinadas pelo ensaio de penetração a 25 °C (pen25) e pelo método do anel e bola (TAB), respectivamente. Existem ainda outras propriedades já indicadas anteriormente no Quadro 3-2.

Quadro 3-2: Especificação LNEC E 80 (1997) - Propriedades e métodos de ensaio de betumes de pavimentação (LNEC, 1997)

Propriedades [Condições de ensaio]		Métodos de ensaio	
Penetração (0,1 mm) [25 °C, 100 g, 5 s]		EN 1426 (ASTM D 5) <sup>(1)</sup>	
Temperatura de amolecimento pelo método de anel e bola (°C)		EN 1427 (ASTM D 36)	
Viscosidade cinemática (mm <sup>2</sup> /s) [135 °C]		EN 12595 (ASTM D 2170)	
Solubilidade em tolueno ou xileno (%)		EN 12592 (ASTM D 2042 <sup>(1)</sup> )	
Temperatura de inflamação em vaso aberto Cleveland (°C)		EN 22592 (ASTM D 92)	
Resistência ao endurecimento [RTFOT ou TFOT]	Varição de massa (% , ±)	RTFOT: EN12607-1 (ASTM D 2872) ou TFOT: EN 12607-2 (ASTM D 1754)	-
	Penetração (%) [25 °C, 100 g, 5 s]		EN 1426 (ASTM D 5)
	Temperatura de amolecimento (°C)		EN 1427 (ASTM D 36)
	Aumento da temperatura de amolecimento anel e bola (°C) <sup>(2)</sup>		-

<sup>(1)</sup> Ensaio realizado com tolueno ou xileno em substituição de tricloroetileno.

<sup>(2)</sup> Valor obtido pela diferença entre a temperatura de amolecimento antes e depois do endurecimento.

### 3.2.2 Granulado de Borracha

#### 3.2.2.1 O problema ambiental dos pneus usados

Depois da sua utilização, os pneus são resíduos que precisam de encontrar um fim apropriado tanto do ponto de vista ambiental, como económico. Existem várias opções para o destino final dos pneus usados. A borracha é um material não degradável. Devido ao processo de vulcanização, a borracha vulcanizada tem um período indeterminado de degradação na natureza (estima-se que demore de cem mil a um milhão de anos).

A queima de pneus não é uma solução aceitável, devido à libertação de gases poluentes. O armazenamento inadequado de pneus usados, como o armazenamento a céu aberto (Figura 3-3) também apresenta vários problemas.

Este tipo de armazenamento, do ponto de vista ambiental, que para além do péssimo aspecto visual da paisagem, pode dar origem a vários problemas como o risco do incêndio dos pneus (Figura 3-4) devido à combustibilidade dos pneus, a propagação de animais nocivos como os ratos e os insectos e consequentes doenças e, por último, a contaminação da atmosfera, dos solos, dos rios e do lençol freático provocada por produtos tóxicos presentes na constituição dos pneus (Andrietta, 2002).



Figura 3-3: Armazenamento inadequado de pneus usados (Silva, 2007)



Figura 3-4: Incêndio de pneus (Notisul, 2010)

Assim, facilmente se compreendem as razões da proibição completa do armazenamento de pneus a céu aberto. A deposição de pneus usados em aterros sanitários também apresenta problemas, uma vez que a colocação de pneus inteiros dificulta a sua compactação, o que leva à necessidade de cortar os pneus em pedaços, situação que requer equipamentos especiais e bastante espaço para a sua deposição.

Como resultado do disposto no Artigo 5.º, ponto 3 e alínea d) da Directiva Europeia 1999/31/EC do Conselho de 26 de Abril, relativa à deposição de resíduos em aterro, actualmente é proibido depositar pneus usados em aterro. Esta Directiva orientadora obriga os Estados-Membros a concentrarem os seus esforços na responsabilidade ambiental e em recolher e tratar adequadamente os seus pneus usados.

Esta Directiva foi transposta para a legislação portuguesa através do Decreto-Lei n.º 111/2001 de 6 de Abril, que estabelece a proibição da deposição em aterro e da combustão sem recuperação energética.

### 3.2.2.2 Formas de utilização da borracha de pneu

Desta forma, excluindo as alternativas problemáticas do armazenamento a céu aberto e a deposição em aterro, legalmente, existem várias soluções para os pneus usados. Além da recauchutagem e reutilização para outros fins, pode fazer-se a sua valorização energética ou reciclagem.

Estima-se que anualmente sejam gerados em Portugal mais de 7 milhões de pneus usados de diferentes categorias que em massa correspondem a cerca de 90.000 toneladas de pneus. Na Figura 3-5, o gráfico mostra os valores de borracha utilizada, em toneladas, para cada uma das formas de utilização.

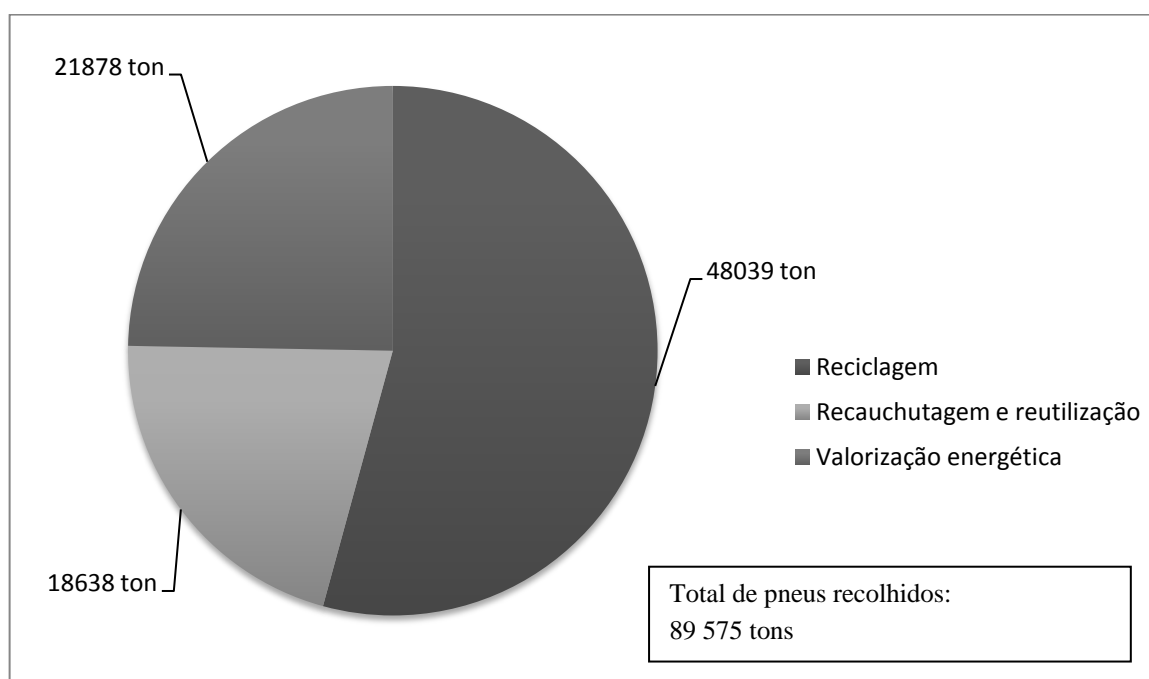


Figura 3-5: Destino dos pneus recolhidos em 2009 (Valorpneu, 2010)

Na reciclagem, os pneus usados são utilizados como matérias-primas, interessando fundamentalmente a borracha vulcanizada, sendo que depois do processamento que se efectua, resultam como produtos finais: têxtil, aço e granulado de borracha com diferentes granulometrias, o qual é vendido para diversas aplicações.

Em relação aos produtos finais obtidos, o aço é vendido a empresas que processam metais (reciclagem) e o têxtil, que até há pouco tempo era depositado em aterro controlado, actualmente também é passível de valorização energética. Enquanto o granulado de borracha é usado, por exemplo, no fabrico de pavimentos desportivos, nomeadamente para campos de futebol, pistas de tartan, recintos desportivos diversos e parques infantis; os granulados mais finos podem ser incorporados no fabrico de MB-BMB para construção ou reparação de pavimentos rodoviários.

Na Figura 3-6, o gráfico mostra os valores de borracha utilizada, em percentagem, para cada aplicação final da reciclagem.

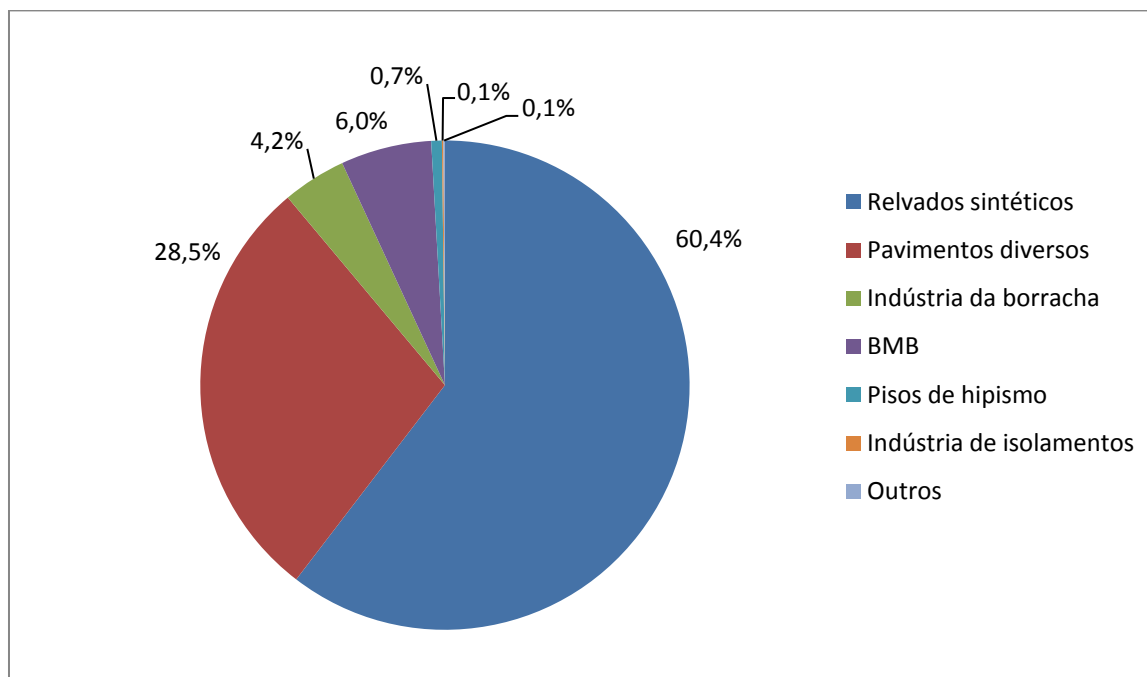


Figura 3-6: Aplicações finais da reciclagem (Valorpneu, 2010)

A aplicação de BMB na pavimentação de estradas em obras públicas em Portugal já está ao abrigo da legislação, desde 2007, de acordo com a entrada em vigor do Despacho n.º 4015/2007, dos Ministérios das Obras Públicas, Transportes e Comunicações e do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional. O referido despacho exige, no seu ponto 1, que “*Os organismos públicos responsáveis pela contratação de empreitadas de construção, reabilitação ou manutenção de infra-estruturas rodoviárias devem prever, nos cadernos de encargos, a utilização, em pavimentos, de misturas betuminosas com incorporação de betumes modificados com borracha provenientes da reciclagem de pneus em fim de vida.*” Segundo o ponto 2 do mesmo Despacho, “*Sem prejuízo de uma análise caso a caso, em função das especificidades de cada empreitada, considera-se vantajosa a utilização de misturas betuminosas que incorporem betumes modificados com borracha que, comprovadamente, cumpram os seguintes objectivos:*

- a) *Elevar a resistência à propagação de fendas, designadamente, através de interfaces anti-fissuras ou camadas anti-propagação de fendas;*
- b) *Reduzir o custo de manutenção dos pavimentos por via da maior durabilidade dos mesmos;*
- c) *Incrementar o atrito no contacto pneu/pavimento, por via das adequadas macro e microtexturas;*
- d) *Reduzir o ruído de circulação, através de misturas drenantes, abertas ou rugosas e de adequada macrotextura.*”

### 3.2.2.3 Obtenção do granulado de borracha

De um modo geral e independentemente do fabricante, os pneus são feitos, principalmente, com borracha natural e sintética, negro de fumo, sílica, antioxidantes, metais, têxteis e outros componentes necessários para induzir a vulcanização da borracha.

Em Portugal, existem basicamente duas tecnologias para obtenção de granulado de borracha (GB) de pneus usados, o processo mecânico e o processo criogénico. O primeiro consiste na trituração mecânica dos pneus. A borracha é fragmentada numa série de trituradoras e moinhos, sendo o aço retirado através de separação magnética e o têxtil separado através da diferença de densidade. No final do processo, o granulado de borracha é dividido em várias gamas, consoante a sua granulometria, recorrendo a crivos com diferentes dimensões de malha (Figura 3-7).

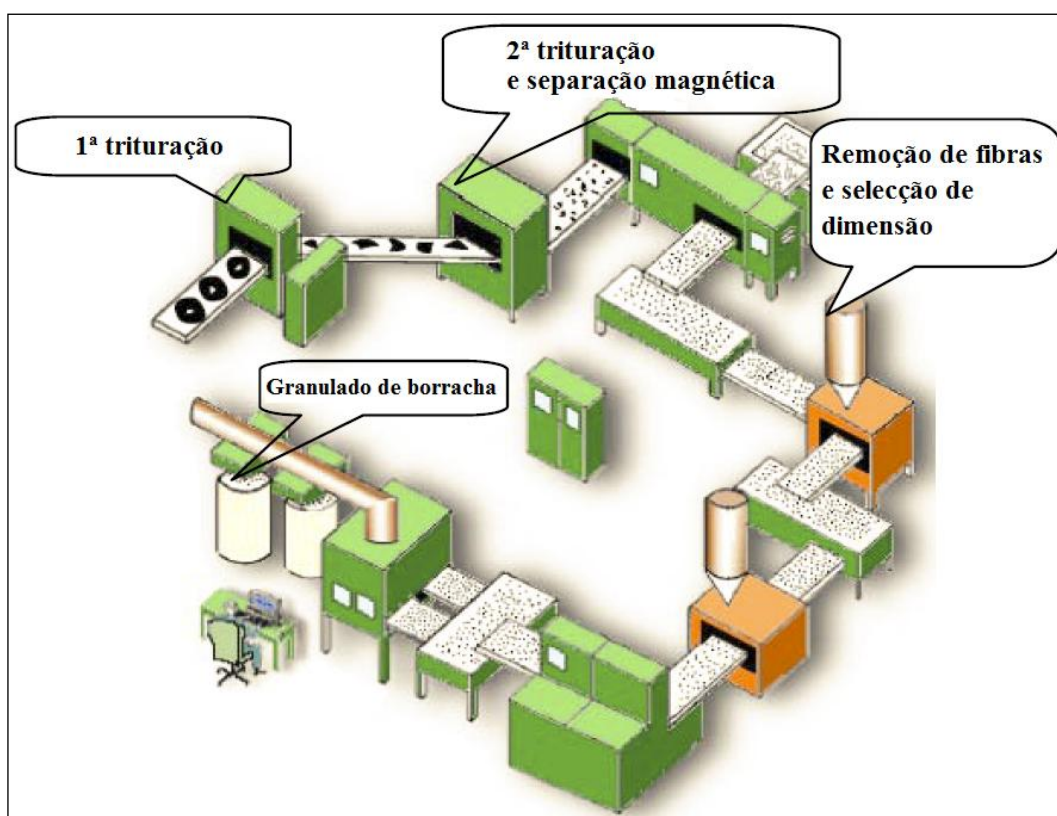


Figura 3-7: Processo mecânico (Neto *et al.*, 2006)

O segundo permite a fragmentação da borracha e a produção de granulado de borracha fino. Neste processo é utilizado azoto líquido para congelar a borracha à temperatura aproximada de  $-160\text{ }^{\circ}\text{C}$  num túnel criogénico. O pneu sofre uma primeira trituração mecânica sendo, em seguida, os seus fragmentos transportados para o túnel criogénico, onde a temperatura de entrada do azoto é de aproximadamente  $-192\text{ }^{\circ}\text{C}$  e a temperatura de saída da borracha é cerca de  $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Após a passagem pelo túnel criogénico e pelos martelos pneumáticos, o aço e o

APLICAÇÃO DE MISTURA BETUMINOSA ABERTA COM BETUME MODIFICADO COM ALTA INCORPORAÇÃO DE BORRACHA NA REABILITAÇÃO DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS

têxtil do pneu são separados da borracha através de separação magnética e por aspiração, respectivamente (Figura 3-8).



Figura 3-8: Processo criogénico (Neto *et al.*, 2006)

A Figura 3-9 mostra o granulado de borracha obtido pelas duas tecnologias, onde é possível visualizar as diferenças no seu aspecto. No processo mecânico, o granulado de borracha mostra uma forma mais irregular, com uma superfície maior do que a obtida pelo processo criogénico, que apresenta uma forma suave e tem uma forma cúbica.

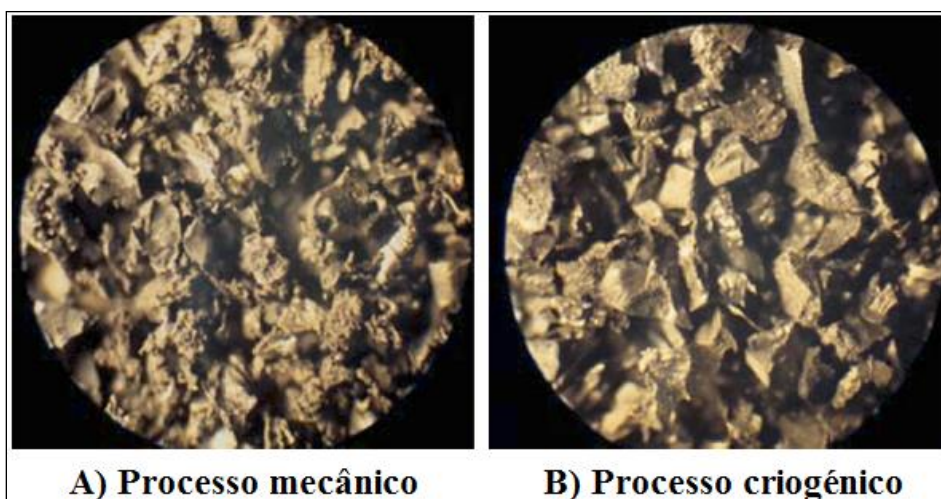


Figura 3-9: Aspecto morfológico da borracha no microscópio óptico (Dias *et al.*, 2008)

### 3. Misturas Betuminosas com Betume Modificado com Borracha (MB-BMB)

O processo criogénico apresenta custos de obtenção da borracha mais elevados, devido à utilização de nitrogénio líquido, mas requer um menor tempo de reacção a menor temperatura da mistura, enquanto o processo mecânico é mais económico a nível da obtenção da borracha, mas requer um maior consumo de tempo e de energia de digestão.

O granulado de borracha é separado, de acordo com a dimensão das partículas de borracha, em vários intervalos de tamanho. De seguida, as Figuras Figura 3-10, Figura 3-11 e Figura 3-12 demonstram a diversidade de calibres das partículas de borracha, tendo, como exemplo, a empresa Biosafe - Indústria de Reciclagens, S.A. Esta empresa produz os seguintes produtos de pó e granulado de borracha: FB 00-08, GB 08-25, GB 25-40, GB 40-70 e GB 70-95.

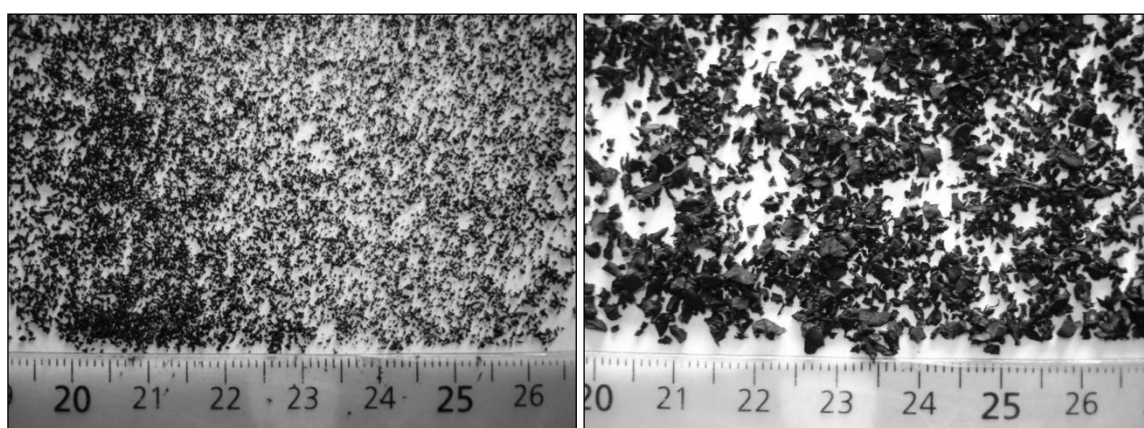


Figura 3-10: Partículas de borracha com dimensões entre 0 e 8 mm e entre 8 e 25 mm

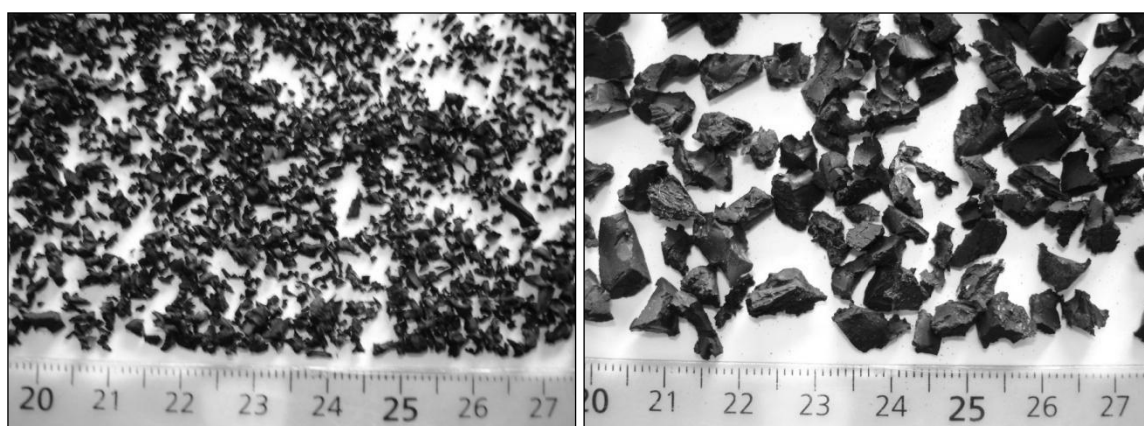


Figura 3-11: Partículas de borracha com dimensões entre 25 e 40 mm e entre 40 e 70 mm



Figura 3-12: Partículas de borracha com dimensões entre 70 e 95 mm

### 3.3 Utilização das misturas betuminosas modificadas

As misturas betuminosas modificadas surgiram devido à necessidade de melhores características nas misturas betuminosas como menor susceptibilidade térmica e maior flexibilidade, de modo a obter uma resposta mais eficaz a maiores solicitações do pavimento, uma maior resistência ao envelhecimento e uma melhor capacidade drenante e de redução do ruído, entre outras.

As misturas betuminosas modificadas surgiram no início dos anos 70 do século XX, nos países mais industrializados e, tem aumentado desde então. Em Portugal, a utilização de misturas betuminosas modificadas intensificou-se a partir da década de 90.

Desde então, os betumes modificados têm sido usados no fabrico de misturas betuminosas em camadas de resistência estrutural, com o objectivo de reduzir a espessura das camadas, para aumentar a vida útil do pavimento ou para reduzir as deformações permanentes que possam ocorrer. Em camadas superficiais, trata-se, sobretudo, de melhorar a segurança e o conforto para o utente durante mais tempo, o que se relaciona com características como a aderência, a regularidade do pavimento, o ruído do rolamento e a resistência ao envelhecimento por acção dos agentes atmosféricos.

Os betumes modificados são uma mistura de betume com aditivos. Segundo Shell (1991), os principais grupos de aditivos utilizados são os elastómeros, os plastómeros, o enxofre, a borracha, as fibras orgânicas ou inorgânicas, e as resinas e endurecedores.

O betume modificado por adição de elastómeros (como o estireno-butadieno-estireno, SBS) tem aumentado o ponto de amolecimento e a ductilidade do betume e reduzida penetração a 25 °C. Além disso, a flexibilidade e a ductilidade a baixas temperaturas são mais favoráveis com um betume modificado. Assim, o SBS pode ser usado nas misturas betuminosas para

### 3. Misturas Betuminosas com Betume Modificado com Borracha (MB-BMB)

preencher os requisitos de melhoramento sob condições de clima frio e quente. Numa mistura com SBS, uma das principais funções do aditivo é aumentar a resistência à deformação permanente. Mesmo usando um betume mole, de penetração 200, com 6% de SBS pode ter-se a mesma resistência à deformação que a proporcionada por um betume convencional 50/70.

O betume modificado por adição de plastómeros, como o etileno-acetato de vinilo (EVA), à temperatura ambiente tem uma maior viscosidade. No entanto, os plastómeros não conduzem a um aumento significativo de elasticidade do betume e quando aquecidos podem separar-se dele, resultando numa dispersão grosseira ao arrefecer. Todavia, mesmo com estas limitações, tornou-se frequente nos países industrializados da Europa do norte, nos anos 70 e 80, o uso de EVA adicionado ao betume de penetração 70, numa concentração da ordem dos 5%.

A modificação por adição de enxofre é sobretudo interessante quando utilizada no tamponamento de covas, em pavimentos flexíveis ou rígidos. É fácil de aplicar nas covas por ser uma mistura muito trabalhável e estável, a superfície ser facilmente nivelada, adquirindo uma rigidez suficiente para suportar o tráfego quando arrefece.

No betume modificado por adição de borracha o objectivo principal é aumentar a viscosidade daquele. Quando a adição é feita directamente no betume (*wet process* na terminologia anglo-saxónica), o resultado final é uma mistura betuminosa mais homogénea do que quando a borracha é usada num estado vulcanizado, por exemplo, sob a forma de fragmentos de pneu pulverizados, e adicionada ao agregado (*dry process*). Neste caso, a sua dispersão no betume é mais difícil, embora seja um processo mais barato na produção de misturas betuminosas.

Nos betumes modificados por adição de fibras utilizam-se geralmente fibras muito curtas e finas (micro-fibras), sejam de origem mineral ou orgânicas. Frequentemente, as fibras são aplicadas em conjunto com o betume puro, obtendo dois tipos de efeitos. Primeiro, as fibras fixam uma quantidade importante de ligante sem risco de fluência, graças à sua grande superfície específica e às suas qualidades de interface. Segundo, as fibras promovem o aumento significativo da resistência mecânica das misturas betuminosas devido à sua geometria alongada com um reforço do mástique (betume + filler + fibra) que liga o agregado.

O betume modificado por adição de resinas e endurecedores resulta da adição de um polímero obtido na mistura de dois componentes líquidos, um contendo uma resina e outro um endurecedor, que reagem quimicamente formando uma forte estrutura tridimensional. As principais diferenças entre um betume tradicional e os ligantes modificados por adição de resinas e endurecedores são as seguintes: i) limitação do período de aplicação, logo após a mistura dos dois componentes; ii) depois do produto ser aplicado, a cura continua, com a resistência aumentada no final do processo; iii) após a cura, este ligante é um material elástico e não apresenta fluência por diminuição da viscosidade. É também muito resistente a ataques químicos de solventes de betume de destilação directa, de combustíveis e de óleos; iv) são

menos susceptíveis à temperatura e não são afectados pelas alterações de temperatura verificadas no pavimento.

De seguida, será analisada com maior profundidade a história das misturas betuminosas com Betume Modificado com Borracha (BMB).

Os esforços para a incorporação de borracha em misturas betuminosas estão sobre investigação desde os anos 1930 e 1940. O objectivo da incorporação de granulado de borracha nas misturas betuminosas convencionais era o de melhorar o comportamento destas e reduzir os níveis de poluição (Mohammad *et al.*, 2000).

A utilização de BMB para utilização em misturas betuminosas a quente iniciou-se na década de 40 quando a Companhia de Reciclagem de Borracha (U.S. Rubber Reclaiming Company) introduziu no mercado um produto composto de material betuminoso e borracha desvulcanizada reciclada denominada Ramflex<sup>TM</sup> (Coley, 1970).

No início dos anos 1950, Lewis e Welborn do Bureau of Public Roads (Secretaria de Estradas Públicas) realizaram um estudo extenso de laboratório para avaliar "O Efeito de Várias Borrachas nas Propriedades de Betumes de Petróleo". Eles usaram 14 tipos de granulados de borracha e três betumes, incluindo "um betume da Califórnia de baixa gravidade, baixo teor de enxofre e de baixo teor de asfaltenos". Os resultados foram publicados na edição de Outubro de 1954 das Vias Públicas juntamente com os resultados da companhia "Laboratório de Estudos de Misturas de Pavimentação de Betume Modificado com Borracha", realizados por Rex e Peck no Bureau of Public Roads. O estudo de misturas teve em atenção uma ampla gama de materiais de borracha vulcanizada e não vulcanizada incluindo a banda de rodagem de pneus usados, borracha de butadieno estireno (SBR), borracha natural, polibutadieno e de borracha valorizada (desvulcanizada).

O interesse e o trabalho nesta área continuaram a crescer, assim como o número de pedidos de patente. Em Março de 1960, o Asphalt Institute realizou o primeiro Simpósio sobre a Borracha no Betume, em Chicago, Illinois, com cinco apresentações e um momento de discussão. Nos anos 70, dois processos de introduzir a borracha nas misturas betuminosas surgiram: o processo húmido e o processo seco.

A via húmida foi desenvolvida em Phoenix, Arizona, e utilizava fragmentos de pneus de borracha no betume quente como um ligante do betume. Foi patenteada por Charles McDonald, ficando conhecido como o inventor do *Asphalt Rubber* (AR). A patente expirou no início dos anos 1990. Actualmente, o *Asphalt Rubber* pertence ao domínio público.

Esta solução tecnológica foi inicialmente desenvolvida em meados dos anos 60, quando o Engenheiro de Materiais Charles McDonald começou a procurar um método de manutenção

### 3. Misturas Betuminosas com Betume Modificado com Borracha (MB-BMB)

dos pavimentos, nomeadamente aqueles que estavam danificados por "cracking". Os primeiros esforços de McDonald resultaram no desenvolvimento de "bandas" pré-fabricadas de pequenas dimensões (0,61 m x 0,61 m) com BMB embebido em papel revestido a parafina.

No entanto, McDonald reconhecendo que a fissuração por fadiga ocorria em áreas maiores, o conceito foi estendido para grandes secções de pavimento, sendo o BMB espalhado com equipamentos *slurry seal*. Com este processo surgiram algumas dificuldades, pois o tipo de equipamento utilizado não permitia a espessura uniforme na pavimentação e, além do mais, para se obter a reacção desejada entre o betume e a borracha foi necessário aumentar a temperatura do betume até 232 °C ou mais.

No entanto, em 1971, a tecnologia estava suficientemente desenvolvida para solucionar estas questões. Nos anos seguintes, os equipamentos foram melhorados e ajustados, nomeadamente, no que diz respeito ao bombeamento, à medição e à capacidade de agitação necessários para lidar com materiais altamente viscosos como o BMB.

Na sequência do desenvolvimento de equipamentos de pulverização adequados para aplicar o betume com borracha, Charles MacDonald e os seus colegas patentaram em 1975 o novo processo de produção deste novo material. Este processo patenteado é descrito como o *MacDonald Process* ou *Wet Process* (via húmida) para produzir *Asphalt Rubber*.

O Departamento de Transportes do Arizona (ADOT) acompanhou desde cedo o desenvolvimento do BMB e, em 1964, fez uma aplicação de manutenção. Em 1968, através de tentativa e erro, houve melhorias satisfatórias podendo de forma segura e consistente ser aplicada a solução. De 1968 a 1972, o ADOT utilizou a tecnologia em seis projectos de reabilitação.

De 1974 até 1989, cerca 1100 km de estrada foram construídos utilizando SAM ou SAMI com BMB, com o objectivo de reduzir as fendas no pavimento. Além disso, o ADOT e a Federal Highway Administration (FHWA) patrocinaram numerosos trabalhos de investigação, aumentando, desta forma, o conhecimento sobre o BMB.

Em 1989, um relatório de investigação do ADOT da história da utilização da solução indica que "o BMB tem sido utilizado com sucesso como uma membrana para controlar a distorção do pavimento, devido aos solos expansivos e para reduzir a reflexão de fendas em sobreposições em pavimentos rígidos e flexíveis".

Ao longo do tempo, o ADOT começou a aperceber-se que a solução poderia ser incorporada na mistura betuminosa, quer *Open Graded* (aberta) quer *Gap Graded* (fechada). Depois de alguns testes iniciais, em 1988, realizou-se a primeira mistura betuminosa com BMB.

Este primeiro projecto consistiu numa camada de 25 mm em mistura aberta usada em vários quilómetros da Interestadual 19, a sul de Tucson, EUA. Esta mistura betuminosa continha 10% de BMB, em peso, da mistura e foi colocada sobre um pavimento de betão. Desde 1988 até 1996, não houve reflexão de fendas, apenas algumas fissuras transversais apareceram sobre as juntas do betão.

Em 2004, o distrito do Departamento de Manutenção reviu o projecto e concluiu que, tal como anteriormente não havia necessidade de qualquer manutenção, isto apesar de 18 anos passados.

A partir deste primeiro projecto, dezenas de outros foram construídos com BMB com sucesso. Em todos eles, o objectivo era controlar as fissuras de reflexão com uma camada fina de material muito elástico.

Actualmente, o AR contém aproximadamente 20% de granulado de borracha de pneus em peso, do teor de betume e, é frequentemente referido como o "Arizona asphalt rubber binder". Quanto à via seca, esta foi desenvolvida na Suécia utilizando fragmentos de pneus de borracha como agregado para ajudar a reduzir o gelo nas estradas.

Em Portugal, as primeiras utilizações de misturas betuminosas com borracha ocorreram nas reabilitações da EN 104 entre Azurara e Trofa, em 1999, e da EN 105 entre Travagem e Santo Tirso, no período de 1999 a 2000.

A primeira obra com betume modificado com borracha por via seca, em território português, ocorreu em Maio de 2009 na EN 370 que liga Avis a Arraiolos. Esta pavimentação com um total de 14 km aconteceu no âmbito de uma reabilitação entre Avis e a ligação a Portalegre/Évora.

Desde a primeira utilização, em 1999, têm sido utilizadas misturas betuminosas com BMB num número significativo de outras obras de construção/reabilitação de pavimentos de estradas municipais e nacionais, tendo a sua aplicação sido igualmente estendida aos Itinerários Complementares, Itinerários Principais e às Auto-Estradas.

### **3.4 Betume Modificado com Borracha**

De acordo com a norma ASTM D 8 – 2002 (ASTM, 2002), betume modificado com borracha (BMB) é uma mistura de betume, borracha de pneus usados e de determinados aditivos na qual a borracha representa pelo menos 15% do peso total da mistura que reagiu com o betume a uma temperatura suficientemente elevada para provocar a reacção das partículas de borracha.

### 3. Misturas Betuminosas com Betume Modificado com Borracha (MB-BMB)

De acordo com o processo de fabrico definido na norma Americana ASTM D 6114-97 reprovada em 2002 (ASTM, 2002), o betume modificado com borracha reciclada de pneus incorpora no mínimo, cerca de 18 a 20%, de borracha sobre o peso total do ligante.

A expressão *Asphalt Rubber* (AR) é a designação em inglês para o ligante betume modificado com borracha. Esta solução tem vindo a ser amplamente utilizada nos Estados Unidos, nomeadamente, nos estados do Arizona, Califórnia e Texas. No Brasil, este produto é designado por "asfalto-borracha".

A produção do BMB é um processo caracterizado pela incorporação de granulado de borracha no betume, embora não seja uma simples adição do granulado de borracha no betume. A modificação do betume é obtida através da digestão do granulado de borracha pelo betume durante um certo período de tempo.

A introdução do granulado de borracha no betume quente faz com que a borracha reaja, e, ao mesmo tempo, absorva e fixe os maltenos que constituem uma das fracções voláteis e aromáticas do betume. A fixação deste constituinte do betume, permite obter um aumento significativo na resistência ao envelhecimento nas misturas betuminosas com BMB, quando comparado com as misturas betuminosas convencionais, onde os maltenos se perdem no tempo por acção dos raios UV. Este facto permite obter uma melhoria considerável das propriedades do betume e da mistura betuminosa no tempo, ou seja, uma maior durabilidade do pavimento.

Do mesmo modo, a incorporação do granulado de borracha no betume permite obter um ligante betuminoso com excelentes propriedades elastómeras, nomeadamente, grande viscosidade a altas temperaturas e uma muito boa flexibilidade a baixas temperaturas.

A justificação para a diferença de desempenho entre as misturas com betume modificado com borracha e as misturas com betume convencional é descrita por Holleran *et al.* (2000). Segundo estes autores, os asfaltenos e as fracções leves (maltenos e resinas) dos betumes convencionais interagem com as partículas de borracha formando uma película de gel sobre estas partículas (Figura 3-13), provocando a fixação das fracções leves que deixam de ser atacadas pelos agentes climáticos, evitando assim a sua evaporação com o tempo. Desta forma, não existe uma reacção química entre o betume convencional e o granulado de borracha. A borracha actua como um aditivo e não como agente modificador, uma vez que o aumento de volume do granulado de borracha é uma difusão e não uma reacção química.

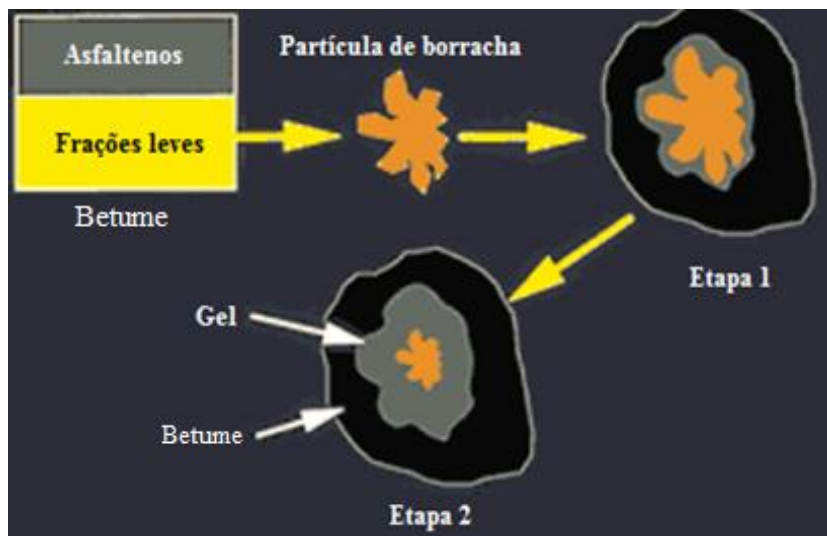


Figura 3-13: Modelo hipotético de interação entre as partículas de borracha granulada e o betume com as várias etapas de reacção (Holleran *et al.*, 2000)

O betume modificado com alta percentagem de borracha reciclada de pneus é obtido a partir da modificação por via húmida, de um betume base de penetração nominal 35/50 ou 50/70, adicionando-se-lhe granulado de borracha numa quantidade que pode variar entre 18% e 22% em massa (sobre a massa total do ligante modificado).

A percentagem de borracha é estabelecida num estudo de formulação, tendo em atenção as características exigidas no projecto. O dimensionamento do BMB requer a definição de algumas variáveis como o teor de borracha, o tempo de digestão e a temperatura, geralmente, com base em ensaios físicos realizados no BMB, como a penetração, a temperatura de amolecimento, a penetração retida e, principalmente, a viscosidade. A adição do granulado de borracha aumenta a viscosidade do betume. Os betumes mais duros só conseguem interagir com uma baixa quantidade de granulado de borracha, enquanto os betumes moles interagem com um alto teor de granulado de borracha.

A Figura 3-14 apresenta a influência da percentagem de granulado de borracha nas características do betume modificado, para dois betumes base, 35/50 e 50/70. Estes resultados foram obtidos para um tempo de digestão de 45 minutos e uma temperatura de 175 °C.

### 3. Misturas Betuminosas com Betume Modificado com Borracha (MB-BMB)

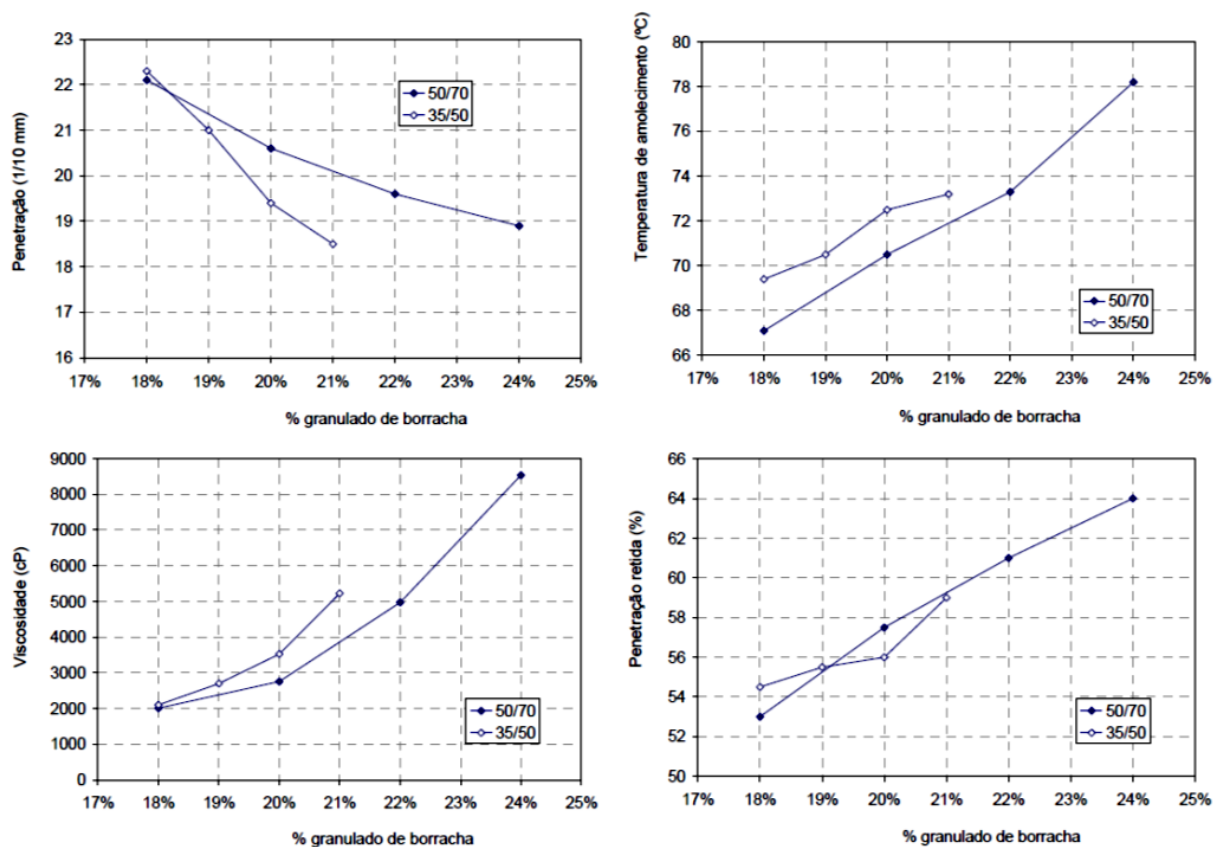


Figura 3-14: Influência da percentagem de granulado de borracha nas características do betume modificado com borracha (Pais *et al.*, 2007)

Os resultados do dimensionamento do BMB permitem observar que o aumento da percentagem de granulado de borracha reduz a penetração: quanto maior o conteúdo, mais duro se torna o BMB. A mesma conclusão pode ser estabelecida para a viscosidade e temperatura de amolecimento. Em termos de penetração retida, o aumento de granulado de borracha produz um BMB mais elástico. Como seria de esperar, os dois betumes base utilizados para a produção de BMB produzem diferentes produtos finais.

O dimensionamento de BMB tem como objectivo definir o conteúdo de granulado de borracha necessário para produzir o BMB e a principal razão é a viscosidade do BMB, pois é importante para garantir uma mistura correcta do ligante com os agregados e uma compactação correcta da mistura betuminosa final.

Ao chegar à central betuminosa, o BMB precisa de ter uma viscosidade específica de modo a ser bombeado de forma apropriada. Actualmente, os equipamentos podem fornecer BMB com uma viscosidade inferior a 5000 cP.

Com base nos resultados apresentados, para o betume base 50/70 é possível adicionar um conteúdo de 22% de granulado de borracha na produção de BMB e para o betume base de 35/50 é possível adicionar apenas uma percentagem de 20% de granulado de borracha.

Distinguem-se, basicamente, três famílias de betumes modificados com borracha:

- a) Betumes de alta percentagem de borracha ou betume de alta viscosidade modificado com granulado de borracha, com uma percentagem superior a 18% em relação à massa total de ligante, identificam-se pela sigla BMBA ou BBA e, por conseguinte, apresentam elevadas viscosidades;
- b) Betumes de média percentagem de borracha ou betume de média viscosidade modificado com granulado de borracha, com percentagens que variam entre 8% e 15% em relação à massa total de ligante, identificam-se pela sigla BMBM ou BBM;
- c) Betumes de baixa percentagem de borracha ou betume de baixa viscosidade modificado com granulado de borracha, com uma percentagem inferior a 8% em relação à massa total de ligante, identificam-se pela sigla BMBB ou BBB e, por conseguinte, apresentam menor viscosidade.

Os betumes de baixa e média percentagem de borracha são geralmente produzidos em fábrica própria, pelo que nesta situação são estáveis ao armazenamento. O sistema de armazenagem dos betumes modificados com borracha estáveis ao armazenamento deve estar provido dos meios necessários para garantir a sua estabilidade.

Os betumes de alta percentagem de borracha são produzidos aquando do fabrico das misturas betuminosas em obra, pelo que não são estáveis ao armazenamento, desta forma, o sistema de fabrico destes ligantes produzidos em obra deve cumprir as especificações particulares estabelecidas pelo produtor para o processo construtivo.

A título de exemplo, no Anexo A apresenta-se informação relativa aos betumes modificados com borracha produzidos por empresas a funcionar em Portugal: RECIPAV (Quadro A-4), CEPSA (Quadros Quadro A-5, Quadro A-6 e Quadro A-7) e GALP (Quadro A-8).

No Anexo A, o Quadro A-2 apresenta as especificações da norma europeia EN 12591:1999 para os betumes modificados com borracha e no Quadro A-3 estão os requisitos físicos para os betumes modificados com borracha segundo a norma ASTM D 6114-97 (2002).

### **3.5 Processos de fabrico de BMB**

Como referido, existem dois métodos que permitam incorporar a borracha de pneus usados em misturas betuminosas: o processo húmido e o processo seco. De seguida, faz-se uma descrição mais detalhada de cada um dos processos.

#### **3.5.1 Processo húmido**

No processo húmido (do inglês *wet process*), também denominado como "via húmida", o granulado de borracha é adicionado ao betume convencional previamente aquecido a

### 3. Misturas Betuminosas com Betume Modificado com Borracha (MB-BMB)

temperaturas à volta de 190 °C com um tempo de digestão<sup>2</sup> de uma a quatro horas (Visser *et al.*, 2000). De acordo com Antunes *et al.* (2002), a temperatura do betume convencional deve estar compreendida entre 175 °C e 220 °C quando a borracha de pneus é adicionada, mantendo contacto por cerca de 45 minutos à temperatura de 180 °C.

Segundo Minhoto *et al.* (2002), o contacto de betume convencional e de borracha ocorre a altas temperaturas, entre 160 °C e 210 °C, durante um determinado período de tempo de reacção, entre uma a quatro horas, adicionando os agregados à posteriori. Como se constata, existem várias metodologias, variando o tempo de reacção e o valor da temperatura consoante o autor. Na Figura 3-15, é apresentado um esquema com as etapas do processo húmido.

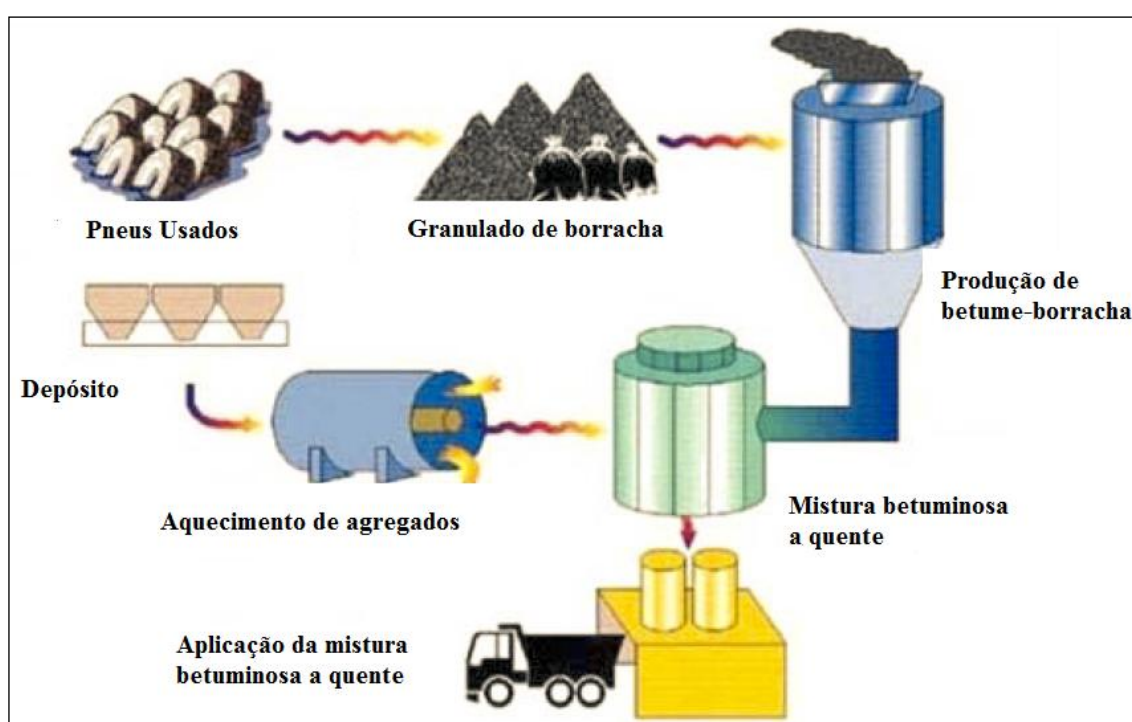


Figura 3-15: Etapas do processo húmido (Neto *et al.*, 2006)

O processo húmido engloba dois sistemas de produção de BMB, o sistema *continuous blend* e o sistema *terminal blend*. No sistema *continuous blend*, o BMB é produzido junto à própria central de produção de misturas betuminosas, através da inclusão de equipamentos adicionais ou em camiões estacionários destinados para esta finalidade, onde o produto é utilizado imediatamente após a sua produção, podendo ser armazenado, no máximo, durante apenas quatro horas. No sistema *terminal blend*, a modificação física, química e reológica do betume convencional acontece através de um processo de fusão por meio de agitação mecânica e digestão térmica devidamente controlada em moinhos de corte que resulta num produto uniforme e estável, possuindo estabilidade que não permite que ocorra a separação de fases

<sup>2</sup> Segundo Caltrans (2003), o tempo de digestão ou de reacção é a expressão utilizada para descrever o tempo necessário para promover a interacção entre o betume e a borracha, quando misturados a elevadas temperaturas.

durante o armazenamento (Morilha *et al.*, 2003). Desta forma, o BMB pode ser produzido e posteriormente transportado para obra. De forma geral, a percentagem de granulado de borracha utilizado no sistema *terminal blend* é bastante inferior à percentagem utilizada no sistema *continuous blend*.

Ainda assim, existem divergências acerca da concepção nos sistemas *continuous blend* e *terminal blend* do processo húmido. Vários autores consideram que o sistema *terminal blend* não é um processo húmido, mas sim, um tipo diferente de betume modificado de borracha. Desta forma, Greenbook (2000) considera existirem três processos de produção de BMB: o processo húmido, o processo seco e o processo *terminal blend*.

### 3.5.2 Processo seco

No processo seco (do inglês *dry process*), também denominado como "via seca", as partículas de borracha são inicialmente adicionadas aos agregados pré-aquecidos, antes do betume convencional ser adicionado. Os agregados são aquecidos a temperaturas entre 200 e 210 °C, durante 15 segundos, até obter uma mistura homogênea. Mais tarde, o betume convencional é aquecido a temperaturas entre 140 e 160 °C e adicionado à mistura de borracha e agregados (Visser *et al.*, 2000; Oliver, 2000). A Figura 3-16 apresenta um esquema com as etapas do processo seco.

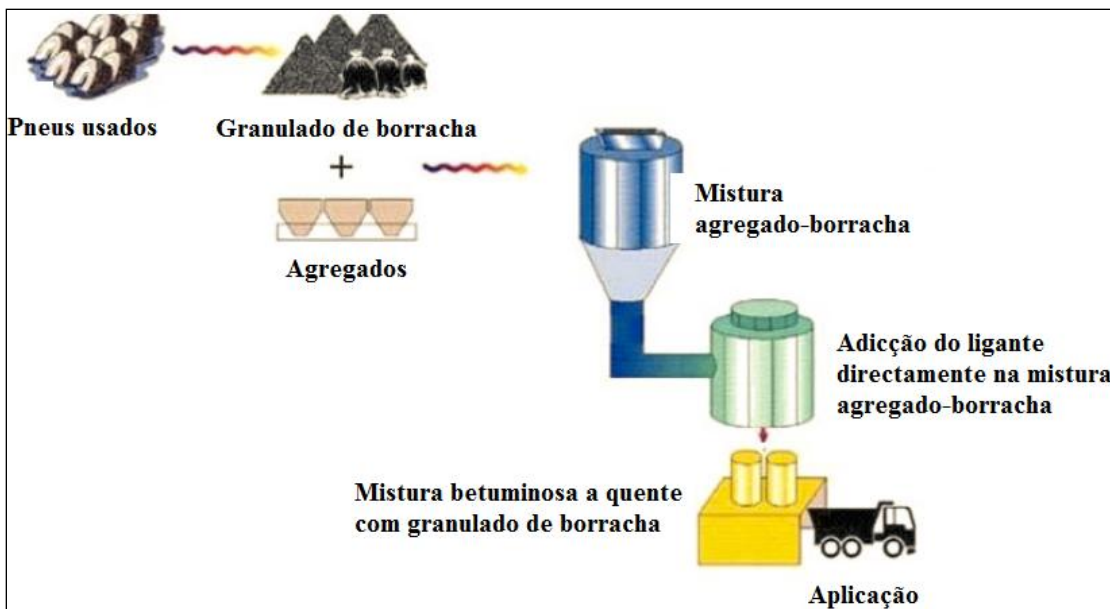


Figura 3-16: Etapas do processo seco (Neto *et al.*, 2006)

A dimensão do granulado de borracha utilizado no processo seco é geralmente maior do que aquele usado no processo húmido. Além disso, no processo seco, o granulado de borracha substitui parte do agregado mineral, comportando-se assim mais como um material inerte (Mohammad *et al.*, 2000).

### 3. Misturas Betuminosas com Betume Modificado com Borracha (MB-BMB)

A expressão "betume modificado com borracha" parece ser mais adequado ao processo húmido. No que se refere ao processo seco, há inicialmente uma mistura, conhecida como "agregado de borracha" ou "borracha-agregado", em que o ligante convencional é adicionado. Além disso, há muita controvérsia entre diversos autores quanto à ocorrência ou não de reacção entre o ligante betuminoso e o granulado de borracha no processo seco e, inclusive, no processo húmido.

No processo seco, de acordo com Visser *et al.* (2000), não há fusão entre o granulado de borracha e o betume. Takallou *et al.* (2003) são da mesma opinião e afirmam que o granulado de borracha actua como um aditivo, não como um adjuvante, mesmo no processo húmido. Pelo contrário, Momm *et al.* (2000), com base em observações no microscópio óptico, afirmam que o granulado de borracha não é inerte e reage com o ligante quente durante o tempo que eles permanecem em contacto durante a operação de transporte, por exemplo.

Supõe-se que as possíveis reacções entre a borracha e o betume no processo seco dependem do tamanho das partículas do granulado de borracha. Partículas menores de borracha têm maiores superfícies específicas, o que deve facilitar o contacto e a reacção com o ligante, mesmo durante períodos mais curtos e temperaturas menores em que estão em contacto, quando comparado com o processo húmido.

O processo seco é um processo mais barato de produção de misturas betuminosas e permite utilizar maiores quantidades de borracha tendo, por isso, vantagens ambientais.

No entanto, segundo Antunes *et al.* (2005), o processo seco é menos vantajoso que o processo húmido, uma vez que aumenta os custos devido a ter uma prestação inferior e pouca reprodutibilidade e apresentar algumas dificuldades aquando da construção do pavimento.

#### **3.5.3 Exemplo de processo de fabrico de BMB em Portugal**

De seguida, é descrito o processo de produção e armazenamento de BMB seguido por uma empresa a operar em Portugal, a RECIPAV, Engenharia e Pavimentos, Lda., para utilização em misturas betuminosas abertas e rugosas com betume modificado com alta percentagem de borracha. Finalmente, apresenta-se o fabrico de misturas betuminosas com BMB. Nesta secção é seguido de perto o descrito em Recipav (2007).

##### **3.5.3.1 Fabrico do ligante BMB®**

O BMB® é fabricado junto das centrais de misturas betuminosas das obras, com equipamento adequado para o efeito, fornecido e instalado pela empresa RECIPAV.

Para o fabrico de BMB®, o betume base, previamente aquecido a uma temperatura aproximada de 190 °C, é introduzido num misturador. Seguidamente, procede-se à adição, em

## APLICAÇÃO DE MISTURA BETUMINOSA ABERTA COM BETUME MODIFICADO COM ALTA INCORPORAÇÃO DE BORRACHA NA REABILITAÇÃO DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS

contínuo, da borracha reciclada de pneus moída, de acordo com a percentagem estabelecida no estudo de formulação. No misturador inicia-se a reacção do betume com a borracha, a qual tem continuação na cisterna de armazenamento do BMB®, para onde a mistura de betume e de borracha é seguidamente transferida.

Para concluir o processo de modificação do betume pela borracha, a mistura de betume e de borracha permanece na referida cisterna durante um período mínimo de 30 minutos, geralmente de 45 minutos, não ultrapassando os 150 minutos, a uma temperatura de 185 °C, em permanente agitação e com controlo da temperatura. Uma vez produzido o BMB®, este é transferido para a unidade de mistura dos materiais da central de fabrico de misturas betuminosas a quente, como exemplificado na Figura 3-17.



Figura 3-17: Instalação do equipamento de fabrico de BMB junto a uma central (Recipav, 2007)

### 3.5.3.2 Armazenamento do BMB®

De uma forma geral, uma vez concluída a produção de BMB®, este é imediatamente transferido para a unidade de mistura dos materiais da central de fabrico. É, no entanto, permitido o armazenamento do betume modificado com borracha produzido por períodos não superiores a 10 horas, a uma temperatura superior a 160 °C e, nunca excedendo 180 °C, em permanente agitação, de forma a garantir a homogeneidade do produto.

Em casos excepcionais, devidamente justificados, poder-se-á armazenar o betume modificado com borracha produzido por períodos superiores, devendo, neste caso, o ligante ser mantido a uma temperatura nominal de 130 °C. Uma vez terminado o período de armazenamento, o BMB® a utilizar na mistura betuminosa deverá ser homogeneizado e novamente aquecido lenta e uniformemente, até atingir a temperatura de fornecimento.

### 3. Misturas Betuminosas com Betume Modificado com Borracha (MB-BMB)

Nas demais disposições gerais de armazenamento e dosagem do ligante modificado serão respeitadas as especificações do caderno de encargos estabelecido pelo dono de obra para ligantes betuminosos a empregar no fabrico de misturas betuminosas a quente e para o tipo de central de produção utilizado na obra.

#### 3.5.3.3 Fabrico da mistura betuminosa com BMB®

A mistura betuminosa com betume modificado com borracha (BM-BMB) pode ser fabricada em centrais contínuas (com tambor secador-misturador) ou descontínuas (com tambor secador e com misturador), devendo a temperatura de fabrico estar compreendida entre 175 °C e 190 °C.

Na unidade de mistura da central de fabrico de misturas betuminosas é realizada a mistura do ligante BMB® com os agregados e o filler nas devidas proporções. A temperatura nominal de fabrico da mistura betuminosa é 180 °C, não devendo, em circunstância alguma, exceder 195 °C.

Nas demais disposições gerais de fabrico a quente da mistura betuminosa serão respeitadas as especificações do caderno de encargos estabelecido pelo dono de obra para o tipo de central de produção utilizado na obra. Na Figura 3-18, é apresentado um esquema demonstrativo com as etapas da produção de misturas betuminosas com betume modificado com borracha.

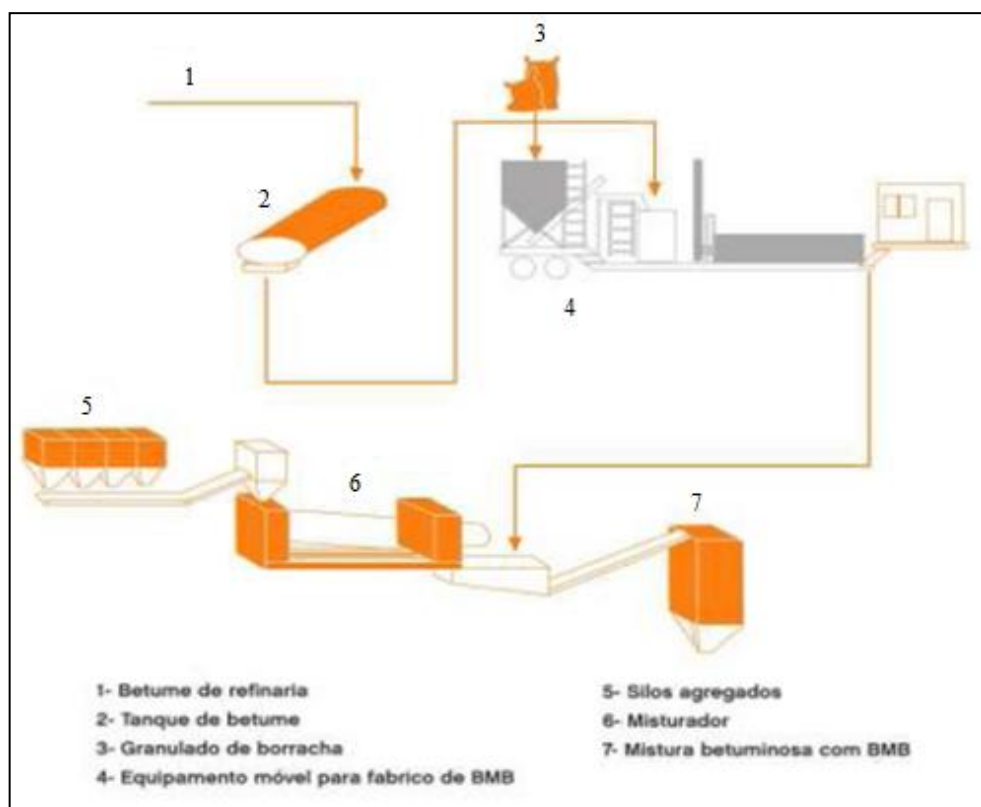


Figura 3-18: Esquema da produção de MB-BMB (Recipav, 2007)

### **3.6 Vantagens e desvantagens das MB-BMB**

Nesta secção são descritas as vantagens e os benefícios das MB-BMB. Também se apresentam as desvantagens e limitações destas misturas, assim como alguns estudos sobre possíveis desvantagens.

#### **3.6.1 Vantagens e benefícios da MB-BMB**

A principal razão para a utilização de BMB é que este proporciona propriedades que melhoraram, significativamente, em relação aos betumes convencionais. A temperaturas intermédias e elevadas, as propriedades físicas do BMB são, significativamente, diferentes daquelas dos betumes convencionais. A borracha endurece o betume e aumenta a elasticidade sobre estes pavimentos a operar num intervalo de temperatura, o que diminui a susceptibilidade do pavimento às temperaturas e melhora a resistência à deformação permanente e à fadiga, com pouco efeito sobre as propriedades a baixas temperaturas.

Segundo vários autores, como Zanzotto *et al.* (1996), Caltrans (2006), Vicente (2006) e Recipav (2007), existem vantagens de diversos tipos, nomeadamente ao nível das técnicas em si e em termos económicos, sociais e ambientais.

Ao nível das vantagens técnicas podem apontar-se as seguintes: i) melhoria de envelhecimento e resistência à oxidação devido ao maior teor de ligante, ao ligante de película mais espessa e aos antioxidantes na borracha do pneu; ii) durabilidade melhorada; iii) redução da susceptibilidade térmica; iv) resistência à fadiga bastante superior em comparação com uma solução convencional; v) melhor resistência à deformação permanente devido à maior viscosidade, aos pontos de amolecimento e à resiliência (ligante mais duro e mais elástico a altas temperaturas); vi) elevada resistência à propagação de fendas; vii) melhor impermeabilização do pavimento; viii) melhor retenção das membranas graças a películas finas de betume altamente modificados; ix) grande flexibilidade das misturas betuminosas.

De ordem económica podem indicar-se as seguintes: i) redução do tempo de construção, devido a camadas mais finas, para casos de ruína por fadiga das camadas betuminosas e, consequentemente, custos de construção, em geral, menores dos que os associados à construção com betumes convencionais; ii) menores custos de manutenção do pavimento, devido à maior durabilidade e ao melhor desempenho do pavimento.

De ordem social podem mencionar-se as seguintes: i) maior segurança rodoviária, devido ao maior atrito no contacto do pneu com o pavimento; ii) maior capacidade drenante; iii) aumento da segurança devido a uma melhor cor de contraste a longo prazo para a sinalização horizontal do pavimento, pois a borracha age como um pigmento que mantém o pavimento mais negro; iv) maior conforto devido à redução no ruído provocado pelo tráfego (ver Anexo C); v) redução dos focos de procriação de insectos prejudiciais à saúde humana.

De ordem ambiental podem sugerir-se as seguintes: i) solução para os pneus utilizados; ii) menor utilização de agregados e petróleo e economia de energia, utilizando produtos de resíduos; iii) redução da poluição visual causada pelo armazenamento de pneus em locais impróprios; iv) diminuição do assoreamento de rios, lagos e baías, causados, em parte, pelo armazenamento indevido de pneus; v) diminuição do número de pneus usados em depósitos, com a conseqüente redução do risco de incêndios incontrolláveis.

#### 3.6.2 Desvantagens e limitações do MB-BMB

As MB-BMB são úteis, mas não são a solução para todos os problemas de pavimentação. As MB-BMB devem ser adequadamente seleccionadas, concebidas, produzidas e executadas para proporcionar as melhorias desejadas ao desempenho do pavimento. A estrutura do pavimento e a drenagem também devem ser adequadas.

Segundo vários autores, como Zanzotto *et al.* (1996), Caltrans (2006), Vicente (2006) e Recipav (2007), a utilização de BMB apresenta algumas desvantagens, das quais salientam-se as seguintes:

- a) o custo inicial da MB-BMB ser superior quando comparado com o custo das misturas convencionais;
- b) os custos de mobilização de equipamentos para a produção de BMB, que em projectos grandes este custo pode ser distribuído pela tonelage de forma que o preço unitário possa ser compensado pelo aumento da vida útil, pelo baixo custo de manutenção e pela espessura reduzida. Para pequenos projectos, o custo de mobilização é o mesmo, resultando num aumento do preço unitário por tonelada que é mais difícil de ser compensado;
- c) a construção pode ser mais desafiante, pois os requisitos de temperatura são mais críticos. A compactação deve ser efectuada a temperaturas superiores às das misturas convencionais, pois tal como nos polímeros, a borracha endurece os ligantes a altas temperaturas. As misturas fechadas podem ser mais resistentes à compactação, devido à natureza da estrutura dos agregados;
- d) os potenciais odores e os problemas de qualidade do ar;
- e) as MB-BMB são muitas vezes difíceis de trabalhar por causa da maior rigidez do ligante e das graduações das misturas;
- f) se a obra for adiada num período superior a 48 horas após a mistura do BMB, alguns ligantes podem não ser utilizáveis, uma vez que o granulado de borracha foi digerido a tal ponto que não é possível atingir a viscosidade mínima especificada, mesmo que seja adicionado mais granulado de borracha, em conformidade com os limites especificados;
- g) em lugares remotos, os agregados a quente e/ou pré-aquecidos podem não estar disponíveis, pois pode não haver uma central de mistura a quente a uma distância razoável do local de trabalho;
- h) a maior complexidade a nível da central betuminosa devida à introdução de mais um material (borracha) e ao aumento da temperatura de funcionamento da central betuminosa;
- i) existir o pagamento de alguns direitos de autor para uso de processos patenteados.

Os problemas que têm sido documentados, normalmente, são questões de construção relacionadas com a pavimentação a temperaturas baixas ou em época húmida. Isto indica que a temperatura foi um importante factor, visto que a temperatura afecta a colocação e compactação de misturas convencionais, mas é mais crítica quando se trabalha com materiais que foram modificados para aumentar a rigidez a altas temperaturas, tal como o BMB e são tipicamente colocados em camadas finas.

As MB-BMB não devem ser utilizados em pavimentação nas seguintes condições:

- i) durante o tempo frio ou chuvoso com temperaturas do ar ou da superfície inferior a 13 °C;
- ii) sobre pavimentos com fissuras graves de largura superior a 12,5 mm;
- iii) quando os dados de tráfego e de deflexão não estão disponíveis;
- iv) áreas onde o trabalho manual necessário é considerável;
- v) quando as distâncias entre a central de mistura e local de trabalho são muito longas para manter a temperatura da mistura, conforme necessário para a colocação e a compactação.

O Departamento de Transportes da Califórnia (Caltrans, 2006) realizou vários estudos sobre possíveis malefícios das MB-BMB.

A nível das limitações do BMB a nível ambiental: com as altas temperaturas e os óleos de diluição altamente aromáticos envolvidos no BMB e na produção da mistura seria de esperar que aumentasse a quantidade de emissões (gases e fumo) gerada pela produção de produtos betuminosos. Isto não é necessariamente verdadeiro, como é evidenciado em numerosos estudos de emissões que foram realizados durante os últimos 20 anos. Os resultados do estudo indicam geralmente pouca ou nenhuma diferença de emissões de materiais convencionais de misturas betuminosas a quente e, nenhum aumento no risco identificável para a saúde ou a segurança das centrais betuminosas, do pessoal de pavimentação ou da população.

No entanto, o odor característico do BMB continua a provocar preocupações com as emissões, porque as pessoas têm uma tendência natural de pensar que os odores fortes indicam um perigo.

Através de testes em centrais betuminosas: os testes realizados nas centrais betuminosas a quente foram realizados durante a produção de MB-BMB, em Nova Jérsei em 1994, Michigan em 1994, Califórnia em 1994, Texas em 1995 e Bay Area em 2001. Os resultados, em geral, indicam que as emissões medidas durante a produção de BMB mantêm-se iguais para a mistura betuminosa convencional e que as quantidades dos eventuais componentes perigosos e de partículas mantêm-se abaixo dos limites obrigatórios. As emissões dos testes de Bay Area mostraram que as emissões medidas de partículas e compostos tóxicos foram sistematicamente inferiores aos factores de emissão de poluentes do ar da EPA AP-42 para as centrais de misturas betuminosas convencionais.

### 3. Misturas Betuminosas com Betume Modificado com Borracha (MB-BMB)

Ao aumentar a temperatura de operação da central de misturas betuminosas, normalmente, as emissões aumentam. As emissões parecem ser directamente mais influenciadas pela temperatura da central operacional, pelo combustível dos queimadores e pelo ligante betuminoso de base do que pelo granulado de borracha.

O granulado de borracha não inclui produtos químicos que apresentem novos riscos para a saúde, quando misturado com o betume. É constituído por vários tipos de borracha e outros hidrocarbonetos, negro de fumo, óleos e cargas inertes. A maioria dos compostos químicos do granulado de borracha também estão presentes no betume, embora as proporções sejam provavelmente diferentes.

A central de fabrico do BMB exige qualidade do ar, mas os níveis de emissões são baixos, devido à natureza essencialmente fechada do processo, sendo necessária apenas uma ventilação mínima.

Quanto à exposição do pessoal de pavimentação: o uso de BMB não parece aumentar os riscos de saúde para o pessoal de pavimentação. Um estudo realizado durante dois anos e meio foi realizado no sul da Califórnia para avaliar os efeitos da "Exposição dos Trabalhadores às emissões de pavimentação com betume (quando se utiliza BMB)". O estudo começou em 1989 e os resultados foram publicados em 1991, antes de dispositivos de captação de fumos e ventilação serem implementados em equipamentos de pavimentação.

O estudo acompanhou trabalhadores de pavimentação em contacto directo com os gases durante operações de pavimentação de misturas quentes e com as aplicações de pulverização. Os pesquisadores puderam verificar que "os resultados demonstraram claramente que os riscos associados ao uso de produtos de BMB foram insignificantes. Os riscos de emissões em operações com BMB não diferem das operações convencionais de betume".

### **3.7 Tipos de misturas com BMB**

Em Portugal, têm sido usados essencialmente dois tipos de misturas, ambas descontínuas, sendo uma delas rugosa e a outra aberta. A mistura betuminosa rugosa (MBR-BMB) caracteriza-se por incorporar no mínimo 8,5% de BMB (Figura 3-19). É utilizada com funções estruturais e funcionais (atrito e ruído) em camadas de base, ligação ou desgaste. Trata-se de uma mistura que quando aplicada sobre camadas fissuradas contribui para retardar a propagação de fissuras, assegurando uma adequada textura superficial, se aplicada em camada de desgaste e uma boa resistência ao envelhecimento graças às elevadas incorporações de ligante que apresenta. As espessuras habituais de aplicação desta mistura variam entre 30 e 60 mm (LNEC, 2007).

A mistura betuminosa aberta (MBA-BMB) caracteriza-se por incorporar no mínimo 9,5% de BMB (Figura 3-20). É utilizada essencialmente com características funcionais (atrato, ruído e projecção de água), apresentando um elevado desempenho na contenção contra a propagação de fendas em camadas de desgaste, devido ao seu elevado teor em ligante. As espessuras habituais de aplicação desta mistura situam-se entre os 20 e os 40 mm (LNEC, 2007).

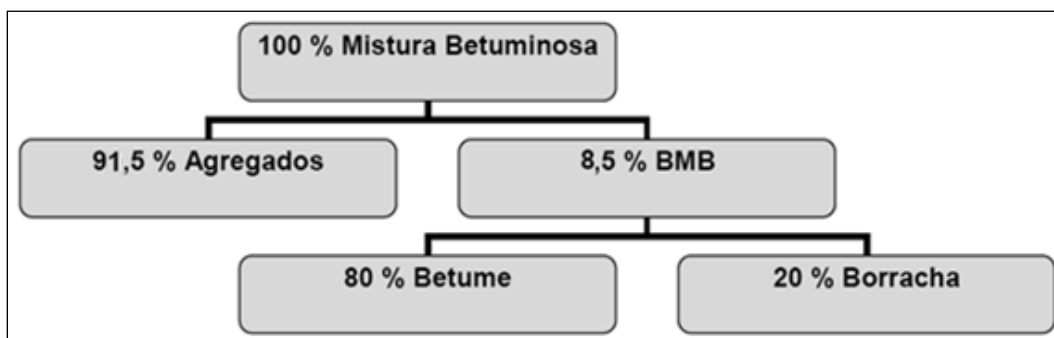


Figura 3-19: Constituição de uma mistura betuminosa rugosa com BMB (Recipav, 2007)

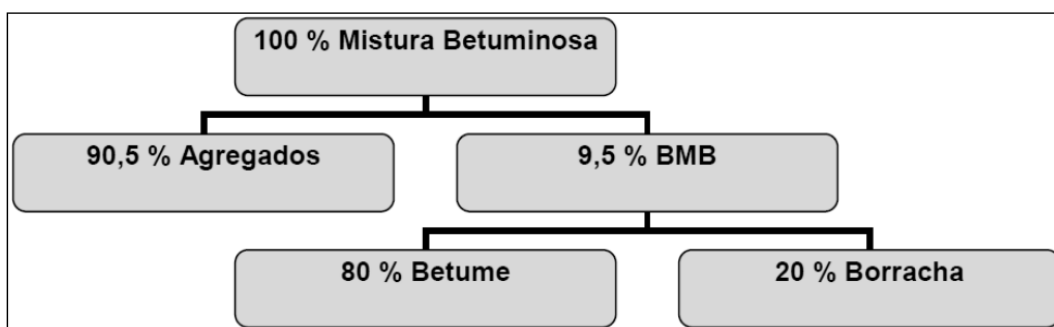


Figura 3-20: Constituição de uma mistura betuminosa aberta com BMB (Recipav, 2007)

Os Quadros B-1 e B-2 do Anexo B apresentam as propriedades das misturas MBR-BMB<sup>®</sup> e MBA-BMB<sup>®</sup>. No Quadro 3-3, resumem-se as principais características apresentadas no documento de homologação das misturas MBR-BMB e MBA-BMB.

Quadro 3-3: Principais características das misturas MBR-BMB e MBA-BMB (LNEC, 2007)

Mistura	Dimensão máxima do agregado (mm)	Ligante	Percentagem de BMB (%) <sup>(1)</sup>	Porosidade da mistura (%)	Profundidade de textura (mm)
MBR-BMB	12,5	BMB com 20 a 22% de borracha	8 a 9	4,5 a 6,5	0,9
MBA-BMB	10,0	BMB com 20 a 22% de borracha	9 a 10	10,0 a 15,0	1,1

<sup>(1)</sup> Percentagem relativa à massa total da mistura

### 3. Misturas Betuminosas com Betume Modificado com Borracha (MB-BMB)

No Quadro 3-4, apresentam-se as principais características das misturas MBR-BMB e MBA-BMB, do ponto de vista do dimensionamento de pavimentos.

Quadro 3-4: Características intrínsecas das misturas betuminosas com BMB  
(adaptado de Fonseca *et al.*, 2006)

Mistura betuminosa	Módulo de deformabilidade (MPa)	Teor volumétrico em betume (%)	Porosidade (%)
MBR-BMB	3800	17,5	4,5 a 6,5
MBA-BMB	2000	19,2	10 a 16

Em termos de macro e microtextura superficial, as misturas com BMB situam-se entre as misturas rugosas e as misturas drenantes, o que proporciona um excelente comportamento em termos da redução do ruído de circulação, aumento do atrito e, em resumo, do conforto e segurança do utente.

Nas Figuras Figura 3-21 e Figura 3-22 e Quadros Quadro 3-5 e Quadro 3-6 indicam-se, como exemplo, os fusos granulométricos onde se inserem os agregados a empregar no fabrico de cada uma das misturas betuminosas.

Quadro 3-5: Fuso granulométrico da mistura de agregados e filler do produto MBR-BMB®  
(LNEC, 2008)

Dimensão nominal das aberturas dos peneiros (NP EN 933-2: 1999 e NP EN 13043: 2004)	Percentagem acumulada de material que passa (%) (NP EN 933-1: 2000)
20 mm	100
14 mm	90 a 100
10 mm	58 a 88
8 mm	38 a 60
4 mm	20 a 32
2 mm	12 a 20
0,500 mm	6 a 13
0,125 mm	4 a 8
0,063 mm	3 a 6

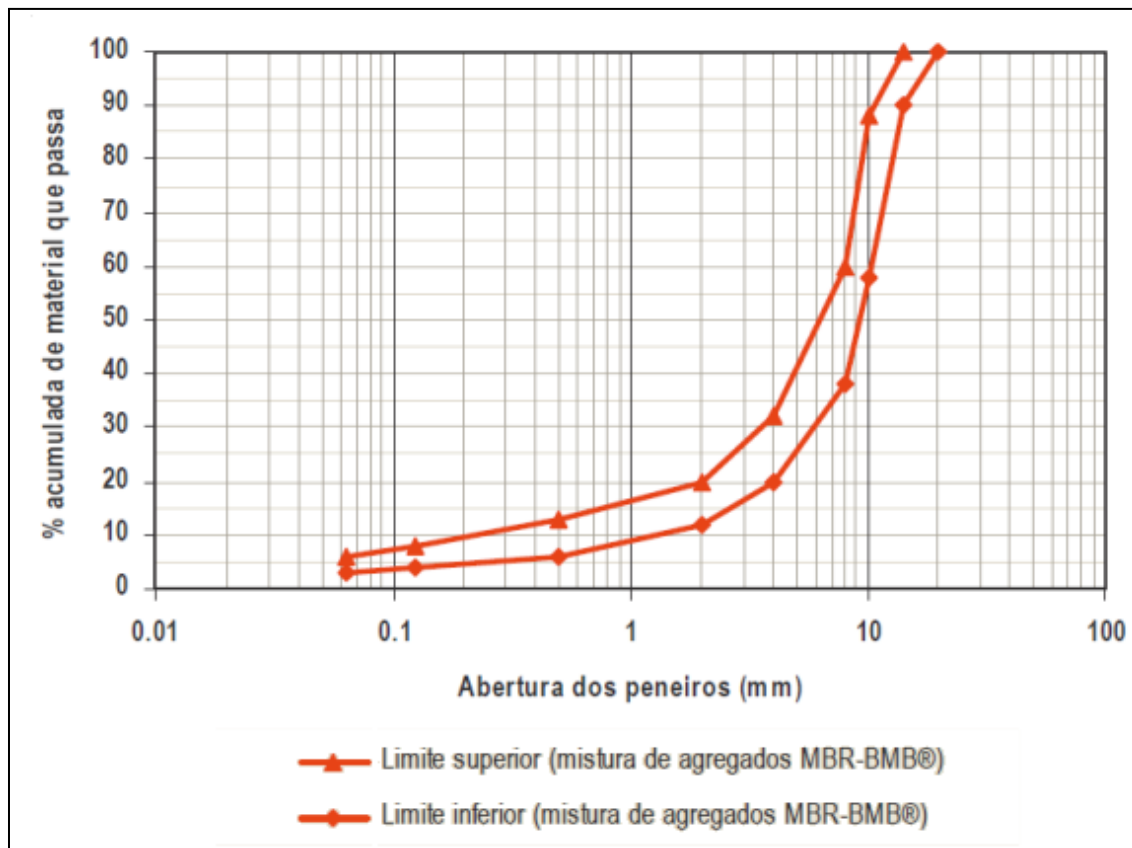


Figura 3-21: Fusão granulométrica da mistura de agregados e filler do produto MBR-BMB® (LNEC, 2008)

Quadro 3-6: Fusão granulométrica da mistura de agregados e filler do produto MBA-BMB® (LNEC, 2006)

Dimensão nominal das aberturas dos peneiros (NP EN 933-2: 1999 e NP EN 13043: 2004)	Percentagem acumulada de material que passa (%) (NP EN 933-1: 2000)
12,5 mm	100
10 mm	90 a 100
8 mm	70 a 88
4 mm	20 a 35
2 mm	6 a 10
0,500 mm	3 a 7
0,063 mm	2 a 4

### 3. Misturas Betuminosas com Betume Modificado com Borracha (MB-BMB)

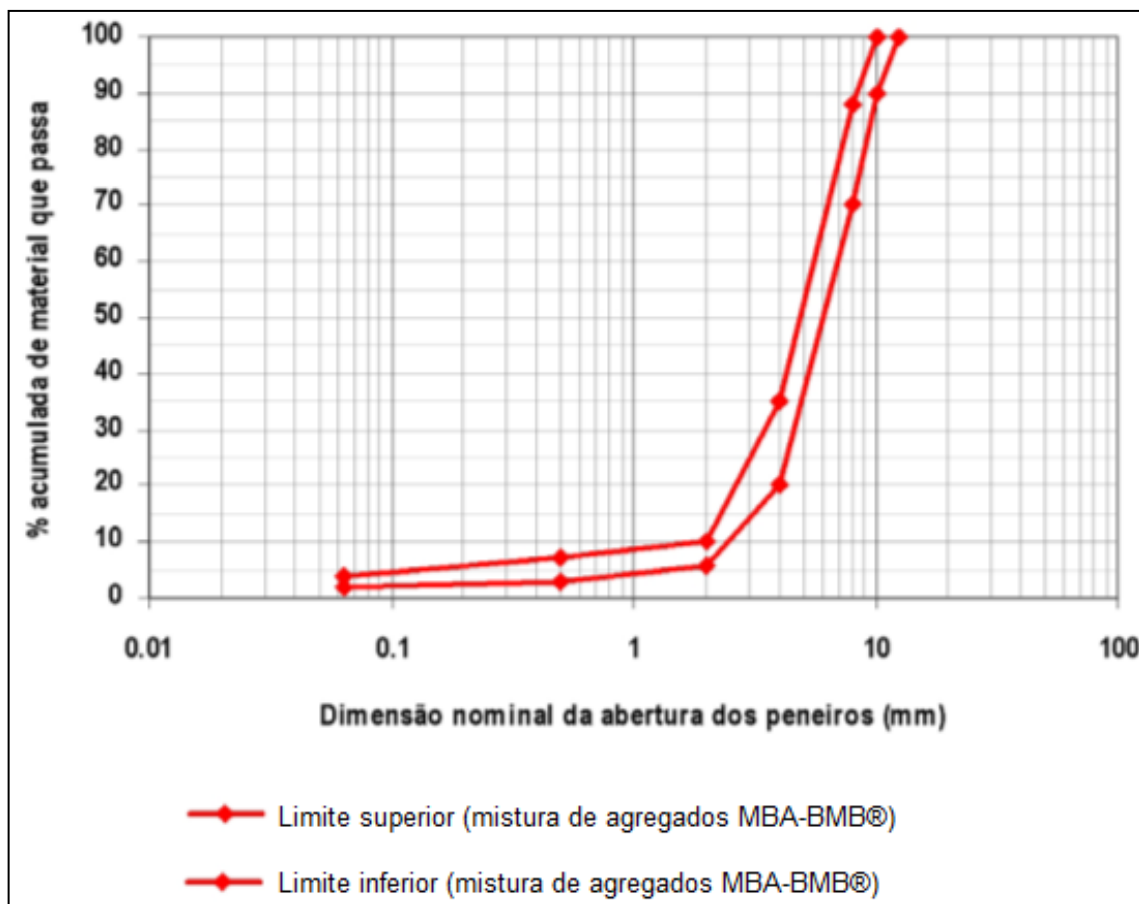


Figura 3-22: Fusão granulométrica da mistura de agregados e filler do produto MBA-BMB® (LNEC, 2006)

No Quadro 3-7 é apresentado o fusão granulométrica do granulado de borracha para as misturas betuminosas com betume modificado com borracha.

Quadro 3-7: Fusão granulométrica do granulado de borracha (LNEC, 2006)

Abertura dos peneiros ASTM	Porcentagem acumulada de material que passa (%) (ASTM D 5644-01)
1,180 mm (nº 16)	100
0,850 mm (nº 20)	95 a 100
0,600 mm (nº 30)	85 a 100
0,430 mm (nº 40)	45 a 70
0,250 mm (nº 60)	5 a 25
0,075 mm (nº 200)	0 a 5

O Caderno de Encargos da Estradas de Portugal (CEEP) actualizado em Fevereiro de 2009 (EP, 2009), reconhece as seguintes misturas betuminosas com betumes modificados com borracha:

- a) Mistura betuminosa aberta com betume modificado com alta percentagem de borracha - MBA-BBA (rubrica 14.03.2.4.6);
- b) Mistura betuminosa rugosa com betume modificado com alta percentagem de borracha - MBR-BBA (rubrica 14.03.2.4.7);
- c) Mistura betuminosa aberta com betume modificado com média percentagem de borracha - MBA-BBM (rubrica 14.03.2.4.8);
- d) Mistura betuminosa rugosa com betume modificado com média percentagem de borracha - MBR-BBM (rubrica 14.03.2.4.9).

O Quadro 3-8 apresenta as várias espessuras consideradas pelo CEEP (EP, 2009) para cada MB-BMB.

Quadro 3-8: Misturas betuminosas com as respectivas espessuras consideradas no CEEP (EP, 2009)

Mistura	2,5 cm	3,0 cm	3,5 cm	4,0 cm	4,5 cm	5,0 cm	5,5 cm	6,0 cm
MBA-BBA	•	•	•	•				
MBR-BBA		•	•	•	•	•	•	•
MBA-BBM		•	•	•				
MBR-BBM		•	•	•				

O CEEP (EP, 2009) ainda considera a membrana de betume modificado com borracha na rubrica 14.03.9.5.7, que admite a utilização de um ligante com alta ou média incorporação de borracha definindo esta escolha consoante a especificidade da obra e o estado da superfície do pavimento.

### 3.8 Camadas selantes

Segundo Branco *et al.* (2008), entre as várias técnicas “anti-fendas”, existem duas formas de resolver o problema das fendas: a eliminação das fendas através da fresagem da camada fendilhada do pavimento existente ou a execução de camadas de reduzida espessura.

Esta segunda opção tem como objectivo reduzir os esforços de corte que tendem a fendilhar as camadas superiores do novo reforço do pavimento. Com a função anteriormente descrita, surgem as camadas selantes e, sendo membranas “anti-propagação” de fendas, não eliminam a propagação de fendas, mas reduzem a sua velocidade de formação.

### 3. Misturas Betuminosas com Betume Modificado com Borracha (MB-BMB)

Estas membranas consistem numa camada betuminosa delgada com betume modificado aplicada sobre toda a superfície de um pavimento betuminoso envelhecido. Têm como objectivo aumentar a resistência da superfície à propagação de fendas em pavimentos betuminosos que apresentam sinais de fadiga generalizada.

Portanto, para além da utilização de BMB em camadas de desgaste, este betume modificado ainda pode ser empregue em camadas selantes.

#### 3.8.1 SAM

A membrana de absorção de tensões (SAM), do inglês *Stress Absorbing Membrane*, é um composto de uma mistura betuminosa a quente com BMB pulverizado na superfície do pavimento existente, seguido, imediatamente, pela aplicação de uma camada de agregado de tamanho uniforme que é enrolado e incorporado na membrana do ligante. A sua espessura nominal, geralmente, varia entre 9 e 12 mm, dependendo do tamanho do agregado. A camada selante SAM é um tratamento de superfície que é usada, principalmente, para restaurar as características de atrito da superfície, preencher as fissuras e fornecer uma membrana impermeável para minimizar a intrusão de águas superficiais na estrutura do pavimento.

Assim, as camadas selantes SAM minimizam o aparecimento de fissuras a partir da base de pavimento flexível ou rígido e, podem ajudar a manter a operacionalidade de pavimentos que aguardam operações de reabilitação ou reconstrução. São utilizadas na conservação e manutenção do pavimento e em reparações limitadas.

#### 3.8.2 SAMI

A membrana de absorção de tensões em intercamadas (SAMI), do inglês *Stress Absorbing Membrane Interlayer*, consiste numa camada de mistura betuminosa com betume modificado, por exemplo, com borracha (cola preta), aplicada a um pavimento fendilhado existente, que é então coberto com uma camada de agregados. A SAMI é compactada e varrida antes de ser coberta com uma nova camada de mistura betuminosa quente (camada de reforço) na superfície de rolamento.

A aplicação de SAMI é uma técnica de manutenção usada para prevenir fendas em pavimentos antigos dando a resistência necessária à propagação de fissuras que poderão existir nas bases desses pavimentos, de modo a evitar causar fendas na superfície do pavimento novo. Garante a recuperação das características funcionais dos pavimentos envelhecidos (macro e microtextura). Isto aumenta a vida útil do pavimento e, consequentemente, reduz os requisitos de manutenção do pavimento. Esta solução poderá ser aplicada numa óptica de conservação periódica de pavimentos.

## APLICAÇÃO DE MISTURA BETUMINOSA ABERTA COM BETUME MODIFICADO COM ALTA INCORPORAÇÃO DE BORRACHA NA REABILITAÇÃO DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS

Na construção de novas estradas com baixa intensidade de tráfego, este tipo de revestimento poderá ser associado a uma base tratada com ligantes hidráulicos. Com esta solução, garante-se uma elevada capacidade de degradação de cargas (solo cimento) e uma adequada impermeabilização e resistência à propagação de fissuras. Esta solução apresenta uma óptima relação custo/benefício quando comparada com soluções convencionais.

Existem vários sistemas de camadas de SAMI: numa camada simples (Figura 3-23 à esquerda), num sistema de três camadas (Figura 3-23 à direita), entre outros.

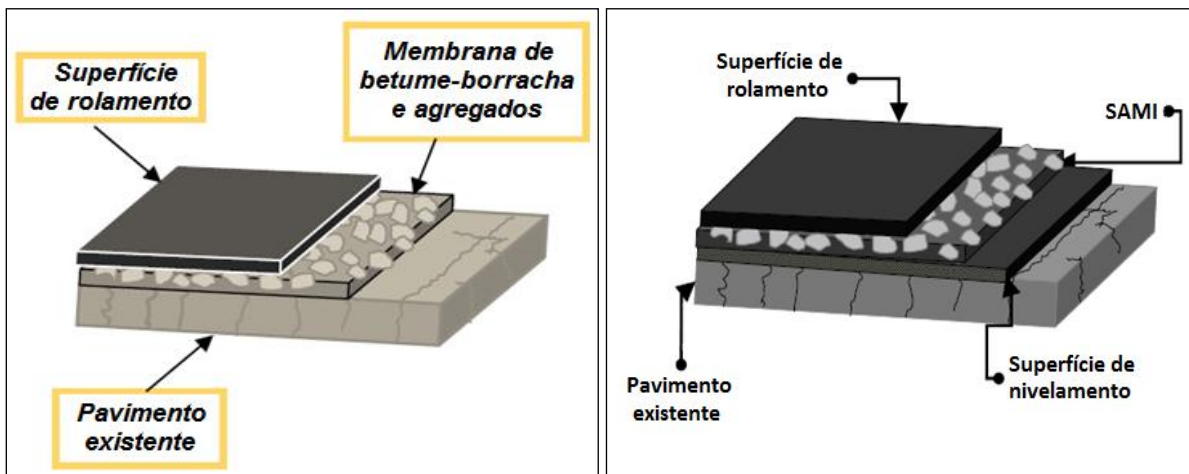


Figura 3-23: Esquemas de SAMI simples e num sistema de 3 camadas (Clemson, 2011; Caltrans, 2006)

A aplicação de SAMI só deve acontecer quando todas as seguintes condições podem ser cumpridas: i) a temperatura ambiente é superior a 18 °C; ii) quando colocada numa base estabilizada de agregados, a mesma está absolutamente seca, ou quando colocado na superfície de um pavimento existente ou novo, o mesmo está absolutamente seco; iii) as condições de vento são tais que é possível uma membrana satisfatória com uma cobertura uniforme.

A utilização de SAMI tem várias vantagens, como sejam a prevenção do aparecimento de fissuras, o aumento da vida útil do pavimento, a redução da necessidade de manutenção, o menor custo de vida do que o do pavimento convencional (devido a exigências de manutenção reduzida) e a utilização benéfica de resíduos de pneus.

No entanto, utilização de SAMI apresenta as seguintes desvantagens: i) custo inicial mais elevado do que o do pavimento convencional; ii) requer tanto a utilização da unidade de mistura ou de coordenação com o fornecedor de ligante; iii) requer o uso de alguns equipamentos especializados (por exemplo, camião distribuidor com injectores de pulverização maiores que o normal); iv) falta de consciência pública (público em geral, padrões e entidades públicas); v) falta de acesso às especificações.

### 3. Misturas Betuminosas com Betume Modificado com Borracha (MB-BMB)

Na Figura 3-24 é apresentada uma execução de SAMI, em que é visível a aplicação de uma camada de agregados sobre uma camada de mistura betuminosa.



Figura 3-24: Camião distribuidor de SAMI (Clemson, 2011)

## 3.9 Principais aplicações de MB-BMB

A utilização de misturas betuminosas com BMB está muito direccionada para aplicações em novas construções ou para a reabilitação de caminhos municipais, estradas e auto-estradas, quer em camadas de desgaste, quer em camadas inferiores.

### 3.9.1 Na reabilitação de pavimentos

Na reabilitação de pavimentos, o seu uso preferencial será em situações de envelhecimento precoce do pavimento por um elevado estado de fadiga e fendilhação ou de forma a melhorar as características superficiais dos mesmos em termos de atrito e/ou ruído de circulação.

Nos pavimentos em estado de ruína por fadiga, as MB-BMB são executadas como camadas de reforço com a execução prévia de uma camada de SAMI sobre o pavimento existente ou com a fresagem do pavimento existente danificado e posterior substituição da parte fresada com a execução de novas camadas, sendo, pelo menos, a camada de desgaste construída com MB-BMB.

As misturas abertas e camadas selantes SAMI têm sido utilizadas de forma a funcionar como sistema anti-fendas e ao mesmo como uma camada impermeabilizante do pavimento existente (Vicente, 2006).

É importante realçar a melhoria significativa do atrito do pavimento, já testada em Portugal, e que apresenta valores 25% superiores quando se compara um pavimento convencional e um pavimento com BMB. Em relação ao ruído de circulação, com a utilização de MB-BMB, segundo testes efectuados nos EUA, poderão conseguir-se reduções de ruído no contacto do pneu com o pavimento, da ordem dos 4 a 8 dB (Recipav, 2010) e no estudo realizado em Portugal na Auto-estrada do Oeste, verificou-se uma redução de ruído entre 5 a 11 dB.

Ainda na reabilitação de pavimentos, a utilização de misturas betuminosas com BMB aparece, muitas vezes, relacionada com reciclagem *in situ* com betume dos pavimentos existentes e em elevado estado de ruína. Esta solução, ou combinação de soluções, permite, por um lado, o aproveitamento e a valorização da estrada em estado de ruína através da reciclagem e, por outro, a aplicação de camadas delgadas de misturas betuminosas com incorporação de borracha reciclada de pneus, que garante a funcionalidade da estrada ao longo do tempo (Recipav, 2010).

### **3.9.2 Na construção de novos pavimentos**

Na construção de novas estradas, o BMB é utilizado em substituição do betume convencional, pois apresenta melhor comportamento face à fadiga e à fendilhação, uma das principais problemáticas dos pavimentos com camadas betuminosas, dando assim uma maior vida útil aos pavimentos flexíveis.

Na construção de novas estradas, a utilização do BMB poderá surgir em conjunto com bases ou leitos de pavimentos tratados com cimento, uma vez que a sua elevada resistência à propagação de fissuras assegura estruturas de pavimentos muito mais económicas do que as estruturas convencionais, além de diminuir o recurso sistemático à utilização das britas, que constituem um recurso natural que convém preservar.

## **3.10 Utilização de MB-BMB em Portugal**

Desde a primeira pavimentação com MB-BM em Portugal em 1999, a sua utilização evoluiu no nosso País. As Figuras Figura 3-25 e Figura 3-26 apresentam os gráficos com a evolução da utilização de misturas betuminosas com betume modificado com borracha, no período compreendido entre 1999 e 2007, com base na informação de Recipav (2007).

### 3. Misturas Betuminosas com Betume Modificado com Borracha (MB-BMB)

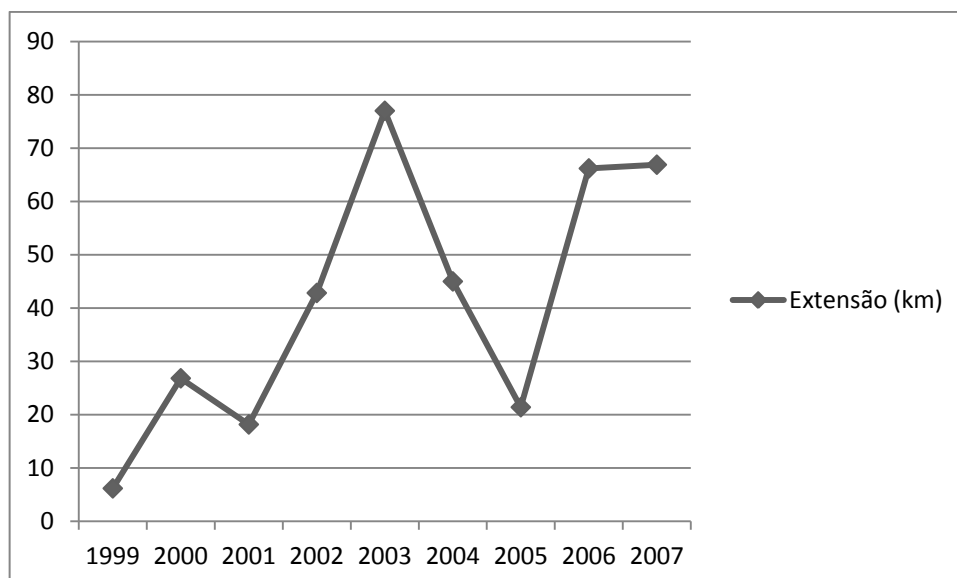


Figura 3-25: Evolução da extensão da utilização de MB-BMB em quilómetros

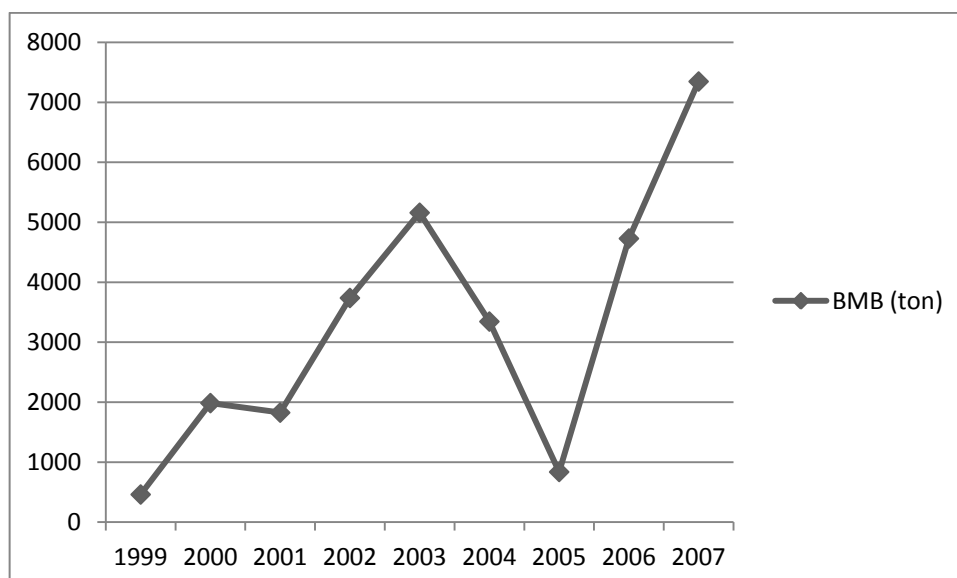


Figura 3-26: Evolução da quantidade utilizada de BMB em toneladas

### 3.11 Relação custo/benefício

Segundo Vicente (2006) e Recipav (2010), a decisão de quando e como empregar as MB-BMB deve ser baseada na relação custo/benefício, tendo em conta os custos envolvidos e as expectativas do desempenho ao longo do período de vida útil das misturas betuminosas. Avaliando as estruturas do pavimento, é possível estudar os custos das MB-BMB comparativamente aos custos das misturas convencionais.

Actualmente, apesar das MB-BMB apresentarem custos superiores às das misturas betuminosas convencionais, também manifestam uma maior resistência à fadiga, assim o

aumento da vida útil à fadiga é um grande benefício proporcionado e tendo em conta esse comportamento à fadiga, é possível reduzir a espessura da camada betuminosa. Segundo alguns autores, como Caltrans (1992) e Fontes *et al.* (2009), é referido mesmo a possibilidade da redução da espessura até 50%. Ora, para esta situação, o benefício das MB-BMB compensa mesmo que esta custe o dobro da mistura betuminosa convencional.

Para o período de vida útil do pavimento, as MB-BMB apresentam menores custos de manutenção, segundo o ADOT é menor cerca de 33%, em comparação com as misturas betuminosas convencionais (Recipav, 2010).

Com a expiração da patente do *Asphalt Rubber* de Charles McDonald, no início da década de 90, o custo do BMB reduziu.

Apresenta ainda diferenças de custo dependentes do tipo de processo de obtenção da borracha escolhido, com o processo criogénico a ter custos mais elevados na obtenção da borracha e embora o processo mecânico tenha menores custos na obtenção da borracha, requer um maior consumo de tempo e de energia de digestão.

Possui os benefícios ambientais da utilização da borracha dos pneus. Embora o benefício ambiental seja difícil, senão mesmo impossível de quantificar, não pode ser desprezado devido à sua elevada importância. As diversas vantagens ambientais já estão mencionadas no subcapítulo 3.6.1.

### **3.12 Considerações finais**

Começou-se por descrever-se os materiais integrantes do BMB, o betume e a borracha.

Narrou-se a história das misturas betuminosas modificadas, em especial das modificadas com borracha. Depois, descreveu-se o betume modificado com borracha, as suas características, os seus processos de fabrico, as vantagens e desvantagens da sua utilização, as várias misturas betuminosas existentes com BMB, incluindo a variante das camadas selantes e as suas aplicações em Portugal.

Por fim, estudou-se a evolução da utilização de misturas betuminosas com BMB em Portugal e examinou-se a relação entre custos e benefícios da utilização de misturas betuminosas convencionais e modificadas com BMB.

## **4. Estudo da aplicação de MB-BMB**

### **4.1 Considerações iniciais**

Tendo em vista o estudo da aplicação de misturas do tipo MB-BMB, no presente capítulo procede-se ao cálculo da vida útil de estruturas de pavimentos novos e de pavimentos com necessidade de reabilitação.

Primeiro descrevem-se os casos de estudo considerados, fazendo referência às estruturas tipo admitidas, às características dos materiais e aos pressupostos admitidos na análise estrutural e na avaliação da vida útil das estruturas.

De seguida, apresenta-se uma síntese das estruturas alternativas consideradas e faz-se uma análise comparativa dos resultados obtidos ao nível da vida útil das estruturas de pavimentos novos e de pavimentos com necessidade de reabilitação. Nestes últimos são admitidas duas situações distintas, uma com aplicação de camada de reforço sem necessidade de fresagem e outra com aplicação de camada de reforço depois da reposição do pavimento degradado após fresagem do mesmo a determinada profundidade.

Por fim, é feita uma análise global dos resultados a que se chegou e são tecidas algumas considerações finais.

## 4.2 Casos de estudo

No estudo de aplicação consideraram-se três situações distintas de utilização de MB-BMB: na construção de pavimentos novos (Situação 1), na reabilitação de pavimentos com aplicação de camada de reforço sem fresagem (Situação 2) e na reabilitação de pavimentos com aplicação de camada de reforço com fresagem (Situação 3).

Para cada uma das três situações anteriores admitiram-se três estruturas de pavimento:

- Pavimento flexível de base granular, com uma espessura total das camadas betuminosas de 15 cm;
- Pavimento flexível de base betuminosa, com uma espessura total das camadas betuminosas de 20 cm;
- Pavimento flexível de base betuminosa, com uma espessura total das camadas betuminosas de 24 cm.

Para cada uma das nove estruturas de base resultantes, foram consideradas três soluções ao nível da camada de desgaste ou reforço, com 4 cm de espessura fixa, sendo simuladas várias combinações múltiplas de estruturas/tipo de misturas betuminosas. As três misturas alternativas admitidas foram as seguintes: (1) betão betuminoso convencional, sem qualquer tipo de modificação; (2) mistura betuminosa rugosa com betume modificado com borracha (MBR-BMB); (3) mistura betuminosa aberta com betume modificado com borracha (MBA-BMB). No

Quadro 4-1 apresenta-se uma síntese dos 27 casos de estudo resultantes da combinação das diferentes situações consideradas.

Quadro 4-1: Síntese das estruturas alternativas consideradas

Situação	Estruturas base	Tipo de pavimento	Estruturas alternativas
1- Construção de pavimentos novos	A	Base granular	A1, A2, A3
	B	Base betuminosa	B1, B2, B3
	C	Base betuminosa	C1, C2, C3
2- Reabilitação de pavimentos sem necessidade de fresagem	D	Base granular	D1, D2, D3
	E	Base betuminosa	E1, E2, E3
	F	Base betuminosa	F1, F2, F3
3- Reabilitação de pavimentos com necessidade de fresagem	G	Base granular	G1, G2, G3
	H	Base betuminosa	H1, H2, H3
	I	Base betuminosa	I1, I2, I3

O pavimento é constituído por uma estrutura multi-camadas onde cada camada é considerada homogénea, elástica e isotrópica, estendendo-se infinitamente na direcção horizontal. Embora o comportamento elástico constitua uma aproximação, consideram-se as respectivas características mecânicas, módulo de deformabilidade (E) e coeficiente de Poisson ( $\nu$ ). No

caso das misturas betuminosas convencionais, a utilizar em pavimentos novos, na reposição após fresagem ou em camada de reforço, admitiu-se um módulo de deformabilidade de 4000 MPa. Adoptou-se este valor por ser o módulo de referência adoptado no MACOPAV (JAE, 1995). Nos pavimentos com necessidade de reabilitação considerou-se uma degradação do pavimento consubstanciada numa redução de 25% do módulo das camadas betuminosas na hipótese 2 (3000 MPa) e de 50% na última hipótese (2000 MPa).

As características mecânicas adoptadas para as misturas MBR-BMB e MBA-BMB assumem os valores médios dos dados mencionados no Quadro 3-3 e nos dois Documentos de Aplicação do LNEC (LNEC, 2006; LNEC, 2008). O Quadro 4-2 apresenta, em resumo, os valores das características mecânicas das diferentes misturas betuminosas alternativas para aplicação em camada de desgaste ou reforço.

Quadro 4-2: Características mecânicas adoptadas para a camada de desgaste ou reforço

Mistura betuminosa	E (MPa)	v	TVB (%)	n (%)	VMA (%)
(1) Mistura convencional	4000	0,35	12,5	4,0	16,5
(2) MBR-BMB	3800	0,35	17,5	5,5	23,0
(3) MBA-BMB	2000	0,35	19,2	12,5	31,7

O Quadro 4-3 apresenta os valores do módulo de deformabilidade para as diferentes classes de fundação admitidas no MACOPAV. Em termos de fundação do pavimento considerou-se nas nove estruturas de base um módulo de deformabilidade de 100 MPa e que corresponde ao valor de referência para a classe de fundação F3. Desta forma, resultou um módulo de deformabilidade de 200 MPa para a camada granular de sub-base e, no caso das estruturas de base granular, um módulo de 400 MPa para a camada de base.

Quadro 4-3: Classes de fundação e respectivos módulos de deformabilidade (JAE, 1995)

Classe de fundação	Módulo de deformabilidade (MPa)	
	Gama de valores	Valor típico
F1	30 - 50	30
F2	51 - 80	60
F3	81 - 150	100
F4	> 150	150

Para o cálculo do estado de tensão-deformação num pavimento rodoviário, que constitui uma das fases do processo do estudo de pavimentos, existem vários programas de cálculo automático como, por exemplo, o *ELSYM5* da Universidade da Califórnia, o *BISAR* da empresa petrolífera Shell, o *CHEVIT* da empresa petrolífera Chevron, o *ANPAD* da Universidade de Nottingham, o *DAMA* do Asphalt Institute, entre outros. Outra possibilidade é recorrer a métodos numéricos como o método dos elementos finitos (MEF).

Nesta dissertação, optou-se pelo *software* *BISAR 3.0* pelo facto do autor já estar familiarizado com o mesmo e, também, porque a aplicação apresenta um *input* de dados muito simples. O *BISAR 3.0* (*Bitumen Stress Analysis in Roads*) é um programa de cálculo automático desenvolvido pela Shell que permite, além do cálculo de tensões e extensões, a determinação de deflexões. Ainda possibilita a introdução de carregamentos horizontais e a consideração do descolamento entre camadas.

Em todos os carregamentos foi adoptado o carregamento composto por um eixo simples de rodado duplo com uma carga total de 80 kN, carga em cada pneu de 20 kN e espaçamento entre rodas de 0,1575 m. O cálculo da pressão de contacto, tendo em conta o eixo do Método de Shell, foi calculado através da equação (4-1).

$$Pe = \frac{P}{Ac} \quad (4-1)$$

$$\Leftrightarrow Pe = \frac{20}{\pi \times r^2}$$

$$\Leftrightarrow Pe = \frac{20}{\pi \times (0,105)^2}$$

$$\Leftrightarrow Pe = 577 \text{ kPa} \approx 0,6 \text{ MPa}$$

Legenda:

Pe – pressão de enchimento ou pressão de contacto (kPa);

P – carga (kN);

Ac – área de contacto (m<sup>2</sup>);

r – raio da área de contacto, de acordo com o Método de Shell, r = 0,105 m.

Convém referir que em cada estrutura simulada são utilizadas combinações idênticas de espessuras das camadas e respectivos materiais, alterando apenas as características mecânicas da mistura betuminosa da camada de desgaste.

Por fim, como é recomendável, na avaliação da vida à fadiga, a vida útil foi majorada considerando um factor de 2,5 devido à distribuição lateral dos rodados e um factor de 5,0 de modo a ter em conta o repouso entre carregamentos. Nos cálculos referentes à lei da deformação permanente, desta dissertação, foi considerada uma probabilidade de sobrevivência de 95%, correspondendo a um parâmetro  $K1 = 1,8 \times 10^{-2}$ .

## 4.3 Construção de pavimentos novos

### 4.3.1 Síntese das estruturas consideradas

Nas estruturas de base simuladas, as camadas de ligação, de base e de sub-base e a fundação mantêm-se, existindo uma camada de desgaste com uma espessura fixa de 4 cm, alterando-se apenas as características da mistura betuminosa que a constitui. No Quadro 4-4 são apresentadas a geometria e as características mecânicas das estruturas alternativas A1, A2 e A3 e na Figura 4-1 faz-se uma representação esquemática das mesmas.

Quadro 4-4: Geometria e características mecânicas das estruturas alternativas A1, A2 e A3

Camada	Espessura (cm)	E (MPa)	$\nu$	TVB (%)
Desgaste (a)	4	(b)	0,35	(b)
Ligação (MB)	11	4000	0,35	10,0
Base Granular	20	400	0,35	-
Sub-base Granular	20	200	0,35	-
Fundação	$\infty$	100	0,40	-

(a) BD para a estrutura A1, MBR-BMB para a estrutura A2 e MBA-BMB para a estrutura A3;

(b) Depende do tipo de mistura da camada de desgaste (ver Quadro 4-2).

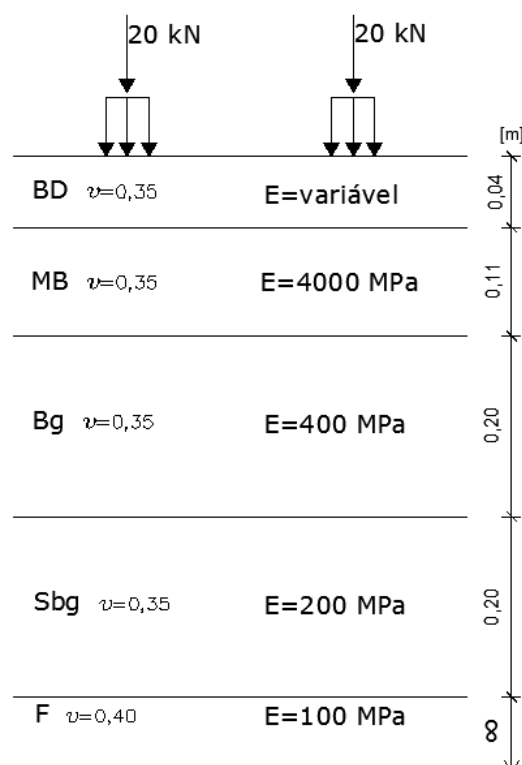


Figura 4-1: Esquema das estruturas A1, A2 e A3

No Quadro 4-5 são apresentadas a geometria e as características mecânicas das estruturas alternativas B1, B2 e B3 e a Figura 4-2 demonstra os respectivos esquemas estruturais.

Quadro 4-5: Geometria e características mecânicas das estruturas alternativas B1, B2 e B3

Camada	Espessura (cm)	E (MPa)	$\nu$	TVB (%)
Desgaste (a)	4	(b)	0,35	(b)
Ligação (MBD)	7	4000	0,35	11,6
Base (MB)	9	4000	0,35	10,0
Sub-base Granular	20	200	0,35	-
Fundação	$\infty$	100	0,40	-

- (a) BD para a estrutura B1, MBR-BMB para a estrutura B2 e MBA-BMB para a estrutura B3;  
 (b) Depende do tipo de mistura da camada de desgaste (ver Quadro 4-2).

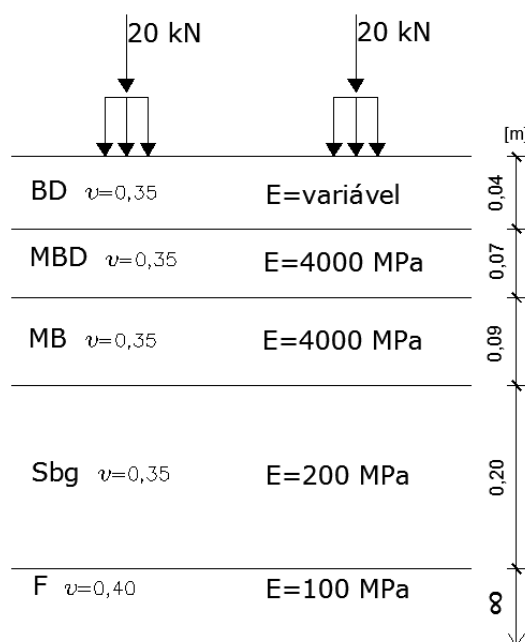


Figura 4-2: Esquema das estruturas B1, B2 e B3

No Quadro 4-6 são apresentadas a geometria e as características mecânicas e a Figura 4-3 demonstra o esquema para as estruturas C1, C2 e C3.

Quadro 4-6: Geometria e características mecânicas das estruturas alternativas C1, C2 e C3

Camada	Espessura (cm)	E (MPa)	$\nu$	TVB (%)
Desgaste (a)	4	(b)	0,35	(b)
Ligação (MBD)	8	4000	0,35	11,6
Base (MB)	12	4000	0,35	10,0
Sub-base Granular	20	200	0,35	-
Fundação	$\infty$	100	0,40	-

- (a) BD para a estrutura C1, MBR-BMB para a estrutura C2 e MBA-BMB para a estrutura C3;  
 (b) Depende do tipo de mistura da camada de desgaste (ver Quadro 4-2).

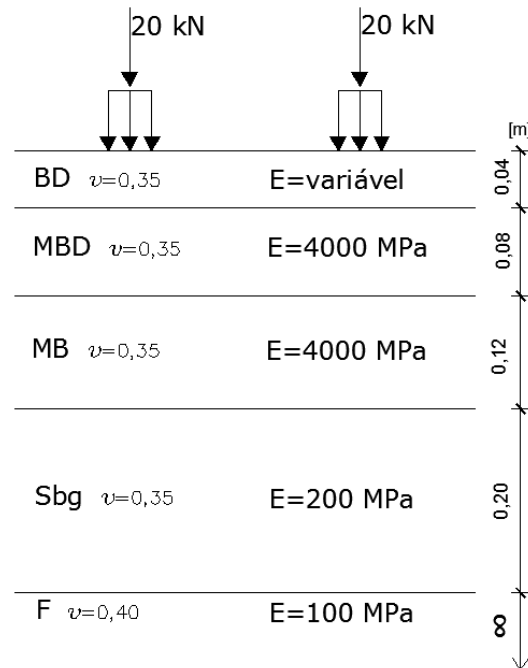


Figura 4-3: Esquema das estruturas C1, C2 e C3

### 4.3.2 Análise dos resultados

Através da extensão horizontal de tracção na base das camadas betuminosas ( $\epsilon_t$ ) e da extensão vertical de compressão no topo do solo de fundação ( $\epsilon_z$ ), foi avaliada a vida útil à fadiga e à deformação permanente considerando as expressões do Método da Shell. O Quadro 4-7 apresenta as vidas úteis para as várias alternativas da estrutura de base A.

Quadro 4-7: Extensões e vidas úteis das estruturas A1, A2 e A3

Estrutura alternativa	Fadiga		Deformação permanente	
	$\epsilon_t$	$N_{adm}$ (milhões)	$\epsilon_z$	$N_{adm}$ (milhões)
A1 (Mistura convencional)	123,2	114,5	223,9	41,8
A2 (MBR-BMB)	123,6	112,6	225,2	40,8
A3 (MBA-BMB)	128,4	93,1	240,7	31,3

A estrutura alternativa A1, com desgaste convencional, apresenta a maior vida útil das três alternativas, exibindo uma vida à fadiga superior à da MBR-BMB em 1,7% (estrutura A2) e 23,0% superior à da MBA-BMB (estrutura A3). No que respeita à vida à deformação permanente a conclusão sobre os resultados é semelhante, revelando a solução convencional uma vida útil ligeiramente superior à da MBR-BMB em 2,5% e 34,4% superior à da MBA-BMB.

Em qualquer dos casos o critério de deformação permanente é condicionante, sendo a vida útil de 41,8 milhões de eixos-padrão para a mistura convencional, 40,8 milhões de eixos-padrão para a MBR-BMB e 31,3 milhões de eixos-padrão para a MBA-BMB.

No Quadro 4-8 apresenta-se uma síntese da vida útil para as várias alternativas da estrutura de base B.

Quadro 4-8: Extensões e vidas úteis das estruturas B1, B2 e B3

Estrutura alternativa	Fadiga		Deformação permanente	
	$\epsilon_t$	$N_{adm}$ (milhões)	$\epsilon_z$	$N_{adm}$ (milhões)
B1 (Mistura convencional)	119,9	131,1	263,5	21,8
B2 (MBR-BMB)	120,4	128,4	265,4	21,2
B3 (MBA-BMB)	127,2	97,6	287,8	15,3

A estrutura B1, com desgaste convencional, apresenta a maior vida útil das três estruturas, tendo uma vida à fadiga 2,1% superior à da MBR-BMB (estrutura B2) e 34,0% superior à da MBA-BMB (estrutura B3). Ao nível da vida à deformação permanente os resultados são semelhantes, revelando a solução convencional uma vida útil ligeiramente superior à da MBR-BMB em 2,8% e 42,5% superior à da MBA-BMB.

A vida útil é de 21,8 milhões de eixos-padrão para a estrutura com mistura convencional, 21,2 milhões de eixos-padrão para a MBR-BMB e 15,3 milhões de eixos-padrão para a MBA-BMB, sendo a mistura convencional a que apresenta uma maior vida útil.

O Quadro 4-9 apresenta as vidas úteis para as várias alternativas da estrutura de base C.

Quadro 4-9: Extensões e vidas úteis das estruturas C1, C2 e C3

Estrutura alternativa	Fadiga		Deformação permanente	
	$\epsilon_t$	$N_{adm}$ (milhões)	$\epsilon_z$	$N_{adm}$ (milhões)
C1 (Mistura convencional)	94,93	421,4	207,5	56,6
C2 (MBR-BMB)	95,35	412,2	208,9	55,1
C3 (MBA-BMB)	100,30	320,1	224,6	41,3

A estrutura C1, com desgaste convencional, apresenta a maior vida útil à fadiga das três estruturas, tendo uma vida restante superior à da MBR-BMB em 2,2% (estrutura C2) e 31,6% superior à da MBA-BMB (estrutura B3). Ao nível da vida à deformação permanente os resultados são semelhantes, revelando a solução convencional uma vida útil ligeiramente superior à da MBR-BMB em 2,7% e 37,0% superior à da MBA-BMB.

A vida útil é de 56,6 milhões de eixos-padrão para a mistura convencional, 55,1 milhões de eixos-padrão para a MBR-BMB e 41,3 milhões de eixos-padrão para a MBA-BMB, sendo a mistura convencional a que apresenta uma maior vida útil.

Na Figura 4-4 apresenta-se um gráfico síntese com os valores de vida útil das estruturas Ai, Bi e Ci. De referir que o critério condicionante foi sempre o de deformação permanente.

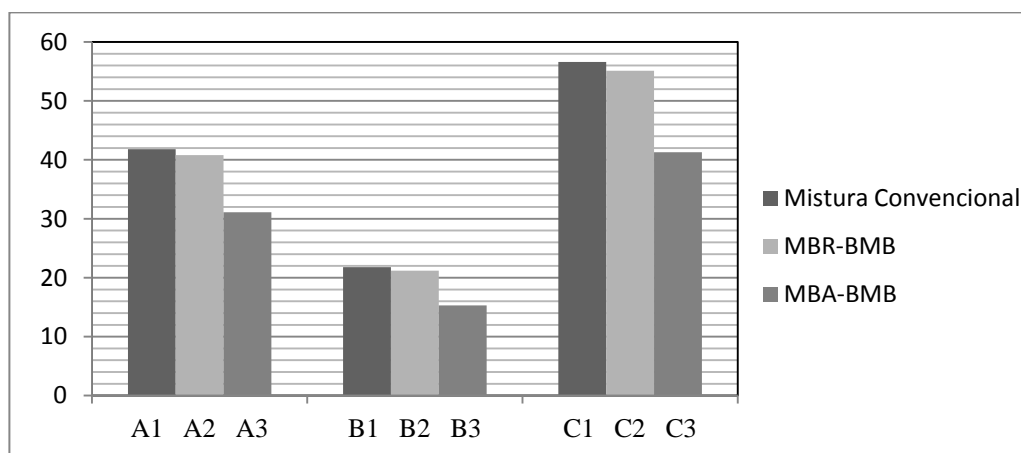


Figura 4-4: Síntese dos valores de vida útil para as estruturas Ai, Bi e Ci

## 4.4 Reabilitação de pavimentos sem fresagem

Nesta secção as estruturas são semelhantes às estruturas dos pavimentos novos anteriormente estudados sendo reduzido o módulo de deformabilidade em 25%, de modo a simular a redução da vida útil do pavimento.

Em cada estrutura simulada, sem necessidade de proceder a qualquer fresagem, são utilizadas combinações idênticas de espessuras das camadas e respectivos materiais, alterando apenas as características mecânicas da mistura betuminosa da camada de reforço.

### 4.4.1 Síntese das estruturas consideradas

As características mecânicas das três misturas betuminosas alternativas a utilizar na camada de reforço são as mesmas descritas na secção 4.2 e apresentadas em resumo no Quadro 4-2. No Quadro 4-10 são apresentadas as características mecânicas e a Figura 4-5 demonstra o esquema inicial para a estrutura de base granular D antes da aplicação da camada de reforço.

Quadro 4-10: Geometria e características mecânicas das camadas da estrutura de base D

Camada	Espessura (cm)	E (MPa)	$\nu$	TVB (%)
Desgaste (BD)	4	3000	0,35	12,6
Ligação (MB)	11	3000	0,35	10,0
Base Granular	20	400	0,35	-
Sub-base Granular	20	200	0,35	-
Fundação	$\infty$	100	0,40	-

APLICAÇÃO DE MISTURA BETUMINOSA ABERTA COM BETUME MODIFICADO COM ALTA INCORPORAÇÃO DE BORRACHA NA REABILITAÇÃO DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS

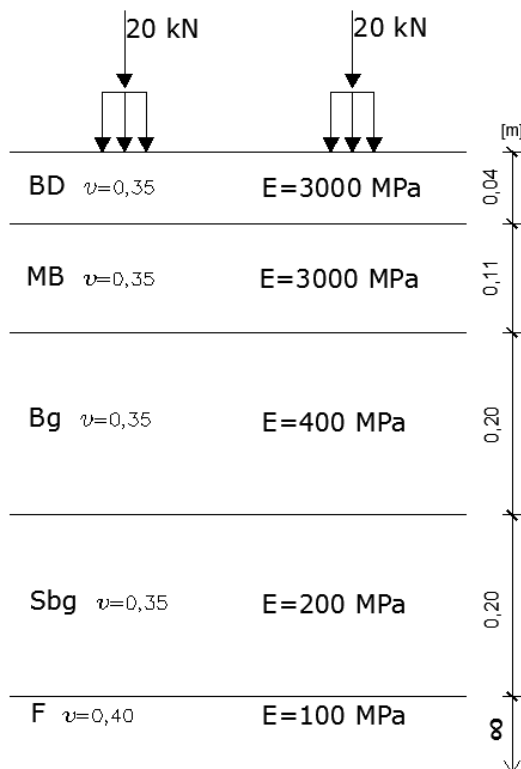


Figura 4-5: Esquema da estrutura base D

No Quadro 4-11 são apresentadas as características mecânicas da estrutura de base E antes da aplicação da camada de reforço e na Figura 4-6 mostra-se o esquema inicial da mesma. O Quadro 4-12 e a Figura 4-7 dizem respeito à estrutura de base F antes da aplicação da camada de reforço.

Quadro 4-11: Geometria e características mecânicas das camadas da estrutura de base E

Camada	Espessura (cm)	E (MPa)	$\nu$	TVB (%)
Desgaste (BD)	4	3000	0,35	12,6
Ligação (MBD)	7	3000	0,35	11,6
Base (MB)	9	3000	0,35	10,0
Sub-base Granular	20	200	0,35	-
Fundação	$\infty$	100	0,40	-

Quadro 4-12: Geometria e características mecânicas das camadas da estrutura de base F

Camada	Espessura (cm)	E (MPa)	$\nu$	TVB (%)
Desgaste (BD)	4	3000	0,35	12,6
Ligação (MBD)	8	3000	0,35	11,6
Base (MB)	12	3000	0,35	10,0
Sub-base Granular	20	200	0,35	-
Fundação	$\infty$	100	0,40	-

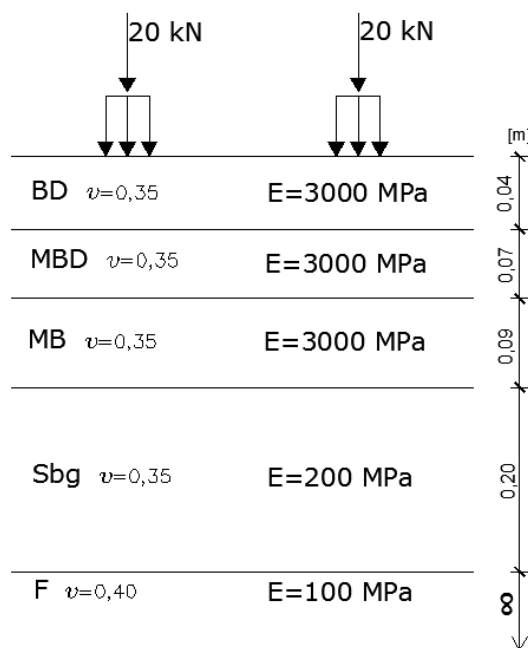


Figura 4-6: Esquema da estrutura base E

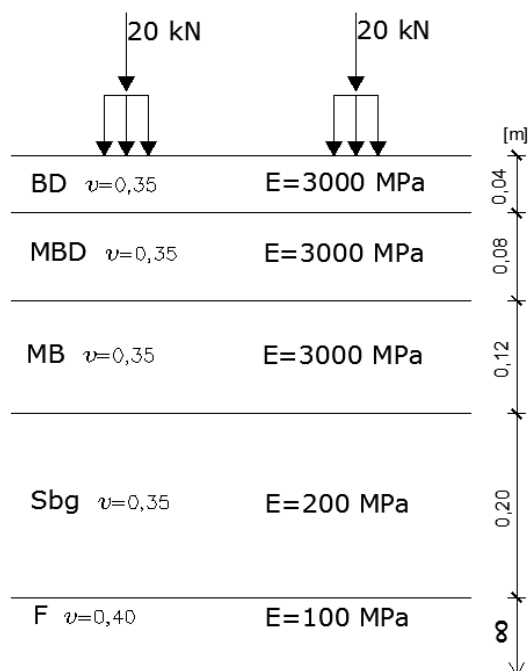


Figura 4-7: Esquema da estrutura base F

#### 4.4.2 Análise dos resultados

O Quadro 4-13 apresenta a vida útil restante da estrutura base D, antes da aplicação da camada de reforço.

Quadro 4-13: Extensões e vidas úteis da estrutura base D

Fadiga		Deformação permanente	
$\epsilon_t$	$N_{adm}$ (milhões)	$\epsilon_z$	$N_{adm}$ (milhões)
140,2	100,7	238,3	32,6

Assim, a vida útil restante, medida através do número acumulado de eixos-padrão de 80 kN admissível ( $N_{adm}$ ), nesta estrutura é determinado pelo Critério da Deformação Permanente, sendo o seu valor de 32,6 milhões de eixos-padrão.

No Quadro 4-14 são apresentadas as características mecânicas das estruturas D1, D2 e D3, e a Figura 4-8 apresenta o respectivo esquema estrutural, após a aplicação das três soluções de reforço na estrutura D.

Quadro 4-14: Características das estruturas D1, D2 e D3

Camada	Espessura (cm)	E (MPa)	$\nu$	TVB (%)
Reforço (a)	4	(b)	0,35	(b)
Desgaste (BD)	4	3000	0,35	12,6
Ligação (MB)	11	3000	0,35	10,0
Base Granular	20	400	0,35	-
Sub-base Granular	20	200	0,35	-
Fundação	$\infty$	100	0,40	-

- (a) BD para a estrutura D1, MBR-BMB para a estrutura D2 e MBA-BMB para a estrutura D3;  
 (b) Depende do tipo de mistura da camada de desgaste (ver Quadro 4-2).

O Quadro 4-15 apresenta a vida útil das estruturas D1, D2 e D3, após a aplicação da camada de reforço.

Quadro 4-15: Extensões e vidas úteis das estruturas D1, D2 e D3

Estrutura alternativa	Fadiga		Deformação permanente	
	$\epsilon_t$	$N_{adm}$ (milhões)	$\epsilon_z$	$N_{adm}$ (milhões)
D1 (Mistura convencional)	111,4	317,8	190,0	80,6
D2 (MBR-BMB)	111,7	313,6	191,1	78,7
D3 (MBA-BMB)	115,4	266,4	204,1	60,5

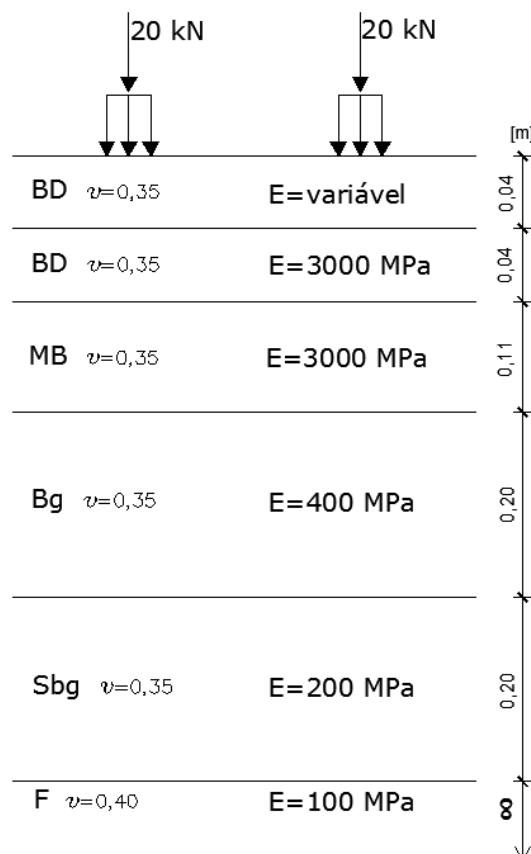


Figura 4-8: Esquema das estruturas D1, D2 e D3 (após reforço)

A estrutura D1, com desgaste convencional, apresenta a maior vida útil das três alternativas, exibindo uma vida à fadiga 1,3% superior à da MBR-BMB (estrutura D2) e 19,3% superior à da MBA-BMB (estrutura D3). Ao nível da vida à deformação permanente os resultados são semelhantes, revelando a solução convencional uma vida útil ligeiramente superior à da MBR-BMB em 2,4% e 33,2% superior à da MBA-BMB.

A vida útil é de 80,6 milhões de eixos-padrão para a estrutura com reforço em mistura convencional, 78,7 milhões de eixos-padrão para estrutura com MBR-BMB e 60,5 milhões de eixos-padrão para a estrutura com MBA-BMB, sendo a mistura convencional a que apresenta uma maior vida útil.

No Quadro 4-16 indica-se a vida útil para a estrutura base E, antes da aplicação da camada de reforço.

Quadro 4-16: Extensões e vidas úteis da estrutura base E

Fadiga		Deformação permanente	
$\epsilon_t$	$N_{adm}$ (milhões)	$\epsilon_z$	$N_{adm}$ (milhões)
143,2	90,6	298,0	13,3

APLICAÇÃO DE MISTURA BETUMINOSA ABERTA COM BETUME MODIFICADO COM ALTA INCORPORAÇÃO DE BORRACHA NA REABILITAÇÃO DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS

Assim, a vida útil restante, medida através do número acumulado de eixos-padrão de 80 kN admissível ( $N_{adm}$ ), nesta estrutura é determinado pelo Critério da Deformação Permanente, sendo o seu valor de 13,3 milhões de eixos-padrão.

No Quadro 4-17 são apresentadas as características mecânicas e a Figura 4-9 apresenta o esquema para as estruturas E1, E2 e E3, após a aplicação da camada de reforço.

Quadro 4-17: Características mecânicas das estruturas E1, E2 e E3

Camada	Espessura (cm)	E (MPa)	$\nu$	TVB (%)
Reforço (a)	4	(b)	0,35	(b)
Desgaste (BD)	4	3000	0,35	12,6
Ligação (MBD)	7	3000	0,35	11,6
Base (MB)	9	3000	0,35	10,0
Sub-base Granular	20	200	0,35	-
Fundação	$\infty$	100	0,40	-

- (a) BD para a estrutura E1, MBR-BMB para a estrutura E2 e MBA-BMB para a estrutura E3;  
 (b) Depende do tipo de mistura da camada de desgaste (ver Quadro 4-2).

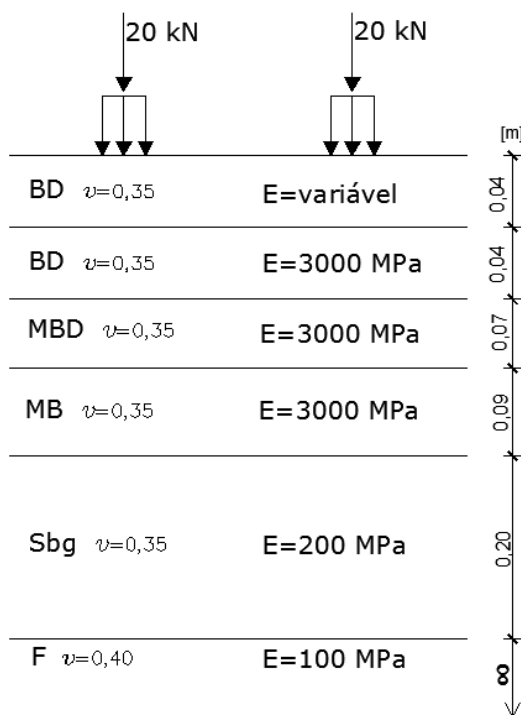


Figura 4-9: Esquema das estruturas E1, E2 e E3 (após reforço)

O Quadro 4-18 apresenta as vidas úteis de serviço das várias misturas betuminosas para as estrutura E1, E2 e E3, após a aplicação da camada de reforço.

Quadro 4-18: Extensões e vidas úteis das estruturas E1, E2 e E3

Estrutura alternativa	Fadiga		Deformação permanente	
	$\varepsilon_t$	$N_{adm}$ (milhões)	$\varepsilon_z$	$N_{adm}$ (milhões)
E1 (Mistura convencional)	111,8	312,2	228,9	38,2
E2 (MBR-BMB)	112,2	306,7	230,5	37,2
E3 (MBA-BMB)	118,0	238,4	248,6	27,5

A estrutura E1, com desgaste convencional, apresenta a maior vida útil das três alternativas, exibindo uma vida à fadiga superior à da MBR-BMB em 1,8% (estrutura E2) e 31,0% superior à da MBA-BMB (estrutura E3). Ao nível da vida à deformação permanente, os resultados são semelhantes, revelando a solução convencional uma vida útil ligeiramente superior à da MBR-BMB em 2,7% e 38,9% superior à da MBA-BMB.

A vida útil é de 38,2 milhões de eixos-padrão para a mistura convencional, 37,2 milhões de eixos-padrão para a MBR-BMB e 27,5 milhões de eixos-padrão para a MBA-BMB, sendo a mistura convencional a que apresenta uma maior vida útil.

O Quadro 4-19 apresenta as vidas úteis de serviço para a estrutura base F (antes da aplicação da camada de reforço).

Quadro 4-19: Extensões e vidas úteis da estrutura base F

Fadiga		Deformação permanente	
$\varepsilon_t$	$N_{adm}$ (milhões)	$\varepsilon_z$	$N_{adm}$ (milhões)
114,4	278,3	237,5	33,0

Assim, a vida útil restante medida através do número acumulado de eixos-padrão de 80 kN admissível ( $N_{adm}$ ), nesta estrutura é determinado pelo Critério da Deformação Permanente, sendo o seu valor de 33,0 milhões de eixos-padrão.

No Quadro 4-20 são apresentadas as características mecânicas e a Figura 4-10 apresenta o esquema para a Estrutura F, após a aplicação da camada de reforço.

Quadro 4-20: Características mecânicas das estruturas F1, F2 e F3

Camada	Espessura (cm)	E (MPa)	$\nu$	TVB (%)
Reforço (a)	4	(b)	0,35	(b)
Desgaste (BD)	4	3000	0,35	12,6
Ligação (MBD)	8	3000	0,35	11,6
Base (MB)	12	3000	0,35	10,0
Sub-base Granular	20	200	0,35	-
Fundação	$\infty$	100	0,40	-

(a) BD para a estrutura F1, MBR-BMB para a estrutura F2 e MBA-BMB para a estrutura F3;

(b) Depende do tipo de mistura da camada de desgaste (ver Quadro 4-2).

APLICAÇÃO DE MISTURA BETUMINOSA ABERTA COM BETUME MODIFICADO COM ALTA INCORPORAÇÃO DE BORRACHA NA REABILITAÇÃO DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS

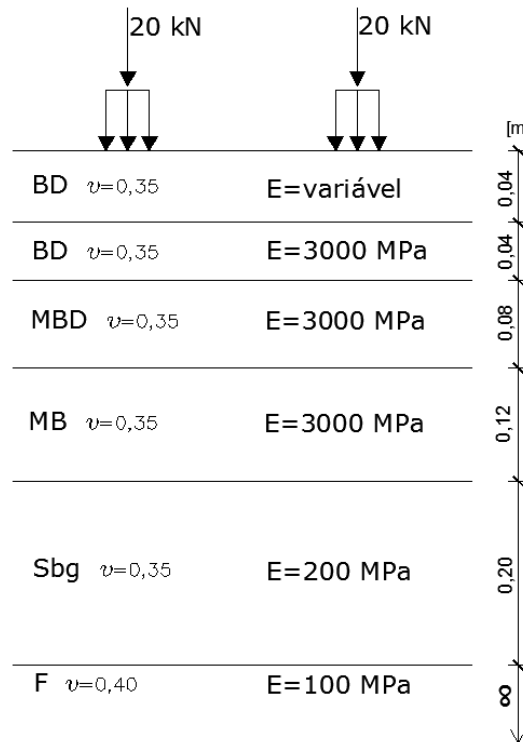


Figura 4-10: Esquema das estruturas F1, F2 e F3 (após reforço)

O Quadro 4-21 apresenta a vida útil das várias estruturas  $F_i$ , após a aplicação da camada de reforço.

Quadro 4-21: Extensões e vidas úteis das estruturas F1, F2 e F3

Estrutura alternativa	Fadiga		Deformação permanente	
	$\epsilon_t$	$N_{adm}$ (milhões)	$\epsilon_z$	$N_{adm}$ (milhões)
F1 (Mistura convencional)	90,82	882,5	187,2	85,5
F2 (MBR-BMB)	91,19	864,8	188,4	83,3
F3 (MBA-BMB)	95,61	682,5	202,0	63,0

A estrutura F1, com desgaste convencional, apresenta a maior vida útil das três alternativas, exibindo uma vida à fadiga superior à da MBR-BMB em 2,0% (estrutura F2) e 29,3% superior à da MBA-BMB (estrutura F3). Ao nível da vida à deformação permanente os resultados são semelhantes, revelando a solução convencional uma vida útil ligeiramente superior à da MBR-BMB em 2,6% e 35,7% superior à da MBA-BMB.

A vida útil é de 85,5 milhões de eixos-padrão para a mistura convencional, 83,3 milhões de eixos-padrão para a MBR-BMB e 63,0 milhões de eixos-padrão para a MBA-BMB, sendo a mistura convencional que apresenta uma maior vida útil.

Na Figura 4-11 apresenta-se um gráfico de síntese com representação dos valores de vida útil das estruturas Di, Ei e Fi. De referir que o critério condicionante foi sempre o de deformação permanente.

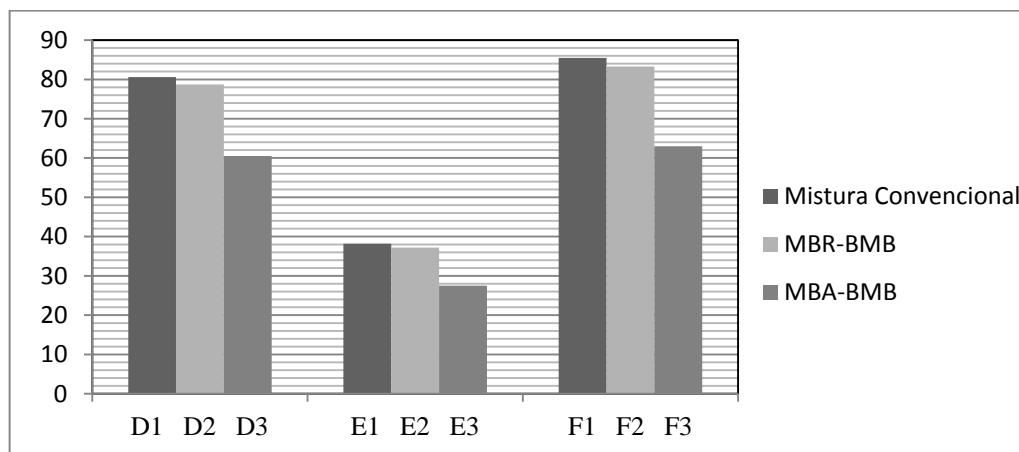


Figura 4-11: Síntese dos valores de vida útil para as estruturas Di, Ei e Fi

## 4.5 Reabilitação de pavimentos com fresagem

Nesta secção as estruturas são semelhantes às estruturas dos pavimentos da reabilitação sem fresagem anteriormente estudados sendo reduzido o módulo de deformabilidade em 50% de modo a simular a redução da vida útil do pavimento. Em cada estrutura simulada, realizando uma fresagem parcial e posterior reposição das camadas betuminosas com módulo de 4000 MPa, são utilizadas combinações idênticas de espessuras das camadas e respectivos materiais, alterando apenas as características mecânicas da mistura betuminosa da camada de reforço.

### 4.5.1 Síntese das estruturas consideradas

As características mecânicas das três misturas betuminosas em estudo estão descritas no subcapítulo 4.2 e apresentadas em resumo no Quadro 4-2. No Quadro 4-22 são apresentadas as características mecânicas e a Figura 4-12 demonstra o esquema para a estrutura base G.

Quadro 4-22: Geometria e características mecânicas das camadas da estrutura de base G

Camada	Espessura (cm)	E (MPa)	v	TVB (%)
Desgaste (BD)	4	2000	0,35	12,6
Ligação (MB)	11	2000	0,35	10,0
Base Granular	20	400	0,35	-
Sub-base Granular	20	200	0,35	-
Fundação	∞	100	0,40	-

APLICAÇÃO DE MISTURA BETUMINOSA ABERTA COM BETUME MODIFICADO COM ALTA INCORPORAÇÃO DE BORRACHA NA REABILITAÇÃO DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS

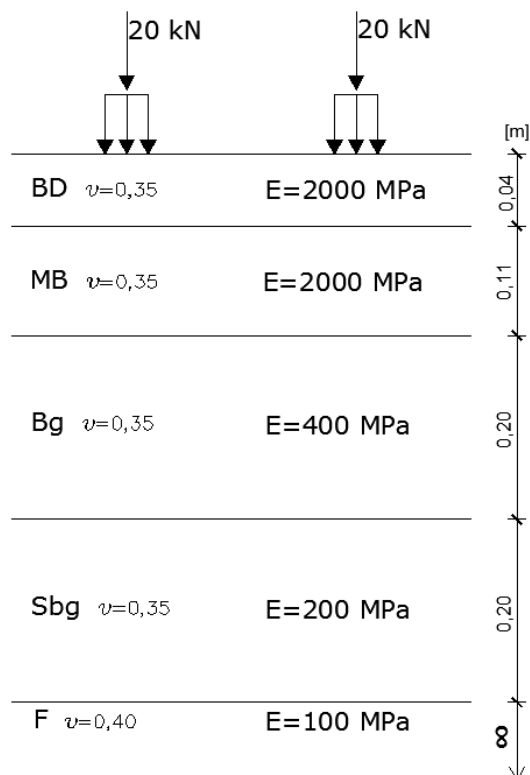


Figura 4-12: Esquema da estrutura base G

No Quadro 4-23 são apresentadas as características mecânicas e a Figura 4-13 demonstra o esquema para a estrutura base H.

Quadro 4-23: Geometria e características mecânicas das camadas da estrutura de base H

Camada	Espessura (cm)	E (MPa)	$\nu$	TVB (%)
Desgaste (BD)	4	2000	0,35	12,6
Ligação (MBD)	7	2000	0,35	11,6
Base (MB)	9	2000	0,35	10,0
Sub-base Granular	20	200	0,35	-
Fundação	$\infty$	100	0,40	-

No Quadro 4-24 são apresentadas as características mecânicas e a Figura 4-14 demonstra o esquema para a estrutura base I.

Quadro 4-24: Geometria e características mecânicas das camadas da estrutura de base I

Camada	Espessura (cm)	E (MPa)	$\nu$	TVB (%)
Desgaste (BD)	4	2000	0,35	12,6
Ligação (MBD)	8	2000	0,35	11,6
Base (MB)	12	2000	0,35	10,0
Sub-base Granular	20	200	0,35	-
Fundação	$\infty$	100	0,40	-

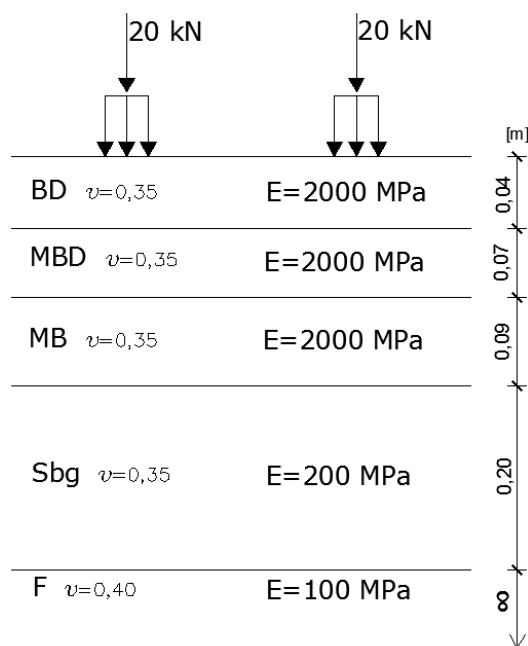


Figura 4-13: Esquema da estrutura base H

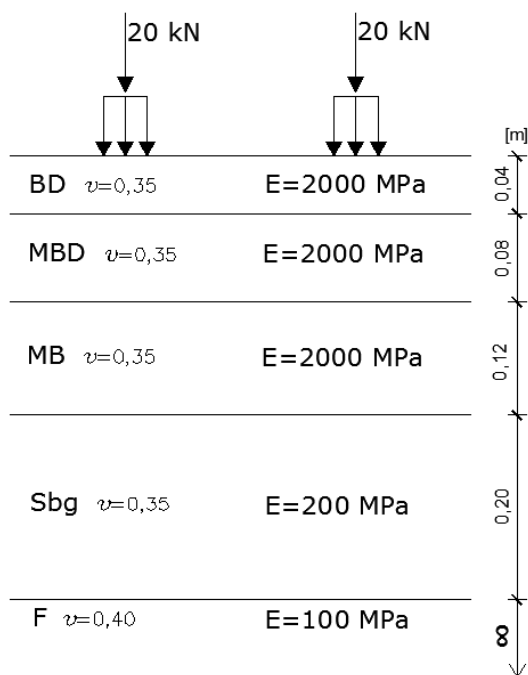


Figura 4-14: Esquema da estrutura base I

### 4.5.2 Análise dos resultados

O Quadro 4-25 apresenta as vidas úteis de serviço para a estrutura base G.

Quadro 4-25: Extensões e vidas úteis da estrutura base G

Fadiga		Deformação permanente	
$\epsilon_t$	$N_{adm}$ (milhões)	$\epsilon_z$	$N_{adm}$ (milhões)
163,7	96,2	257,7	23,8

Assim, a vida útil restante, medida através do número acumulado de eixos-padrão de 80 kN admissível ( $N_{adm}$ ), nesta estrutura é determinado pelo Critério da Deformação Permanente, sendo o seu valor de 23,8 milhões de eixos-padrão.

Neste caso considera-se a fresagem parcial de 9 cm de camadas betuminosas, mais concretamente, a camada de desgaste e parte da camada de base. De seguida, é realizada a reposição com uma camada de MB com 9 cm e as três misturas betuminosas em estudo são aplicadas na camada de desgaste de 4 cm.

No Quadro 4-26 são apresentadas as características mecânicas e a Figura 4-15 apresenta o esquema do pavimento após a fresagem e reposição das camadas betuminosas para as Estruturas Gi.

Quadro 4-26: Características das estruturas G1, G2 e G3, após fresagem e reposição

Camada	Espessura (cm)	E (MPa)	$\nu$	TVB (%)
Desgaste (a)	4	(b)	0,35	(b)
Reposição (MB)	9	4000	0,35	11,6
Ligação (MB)	6	2000	0,35	10,0
Base Granular	20	400	0,35	-
Sub-base Granular	20	200	0,35	-
Fundação	$\infty$	100	0,40	-

- (a) BD para a estrutura G1, MBR-BMB para a estrutura G2 e MBA-BMB para a estrutura G3;  
 (b) Depende do tipo de mistura da camada de desgaste (ver Quadro 4-2).

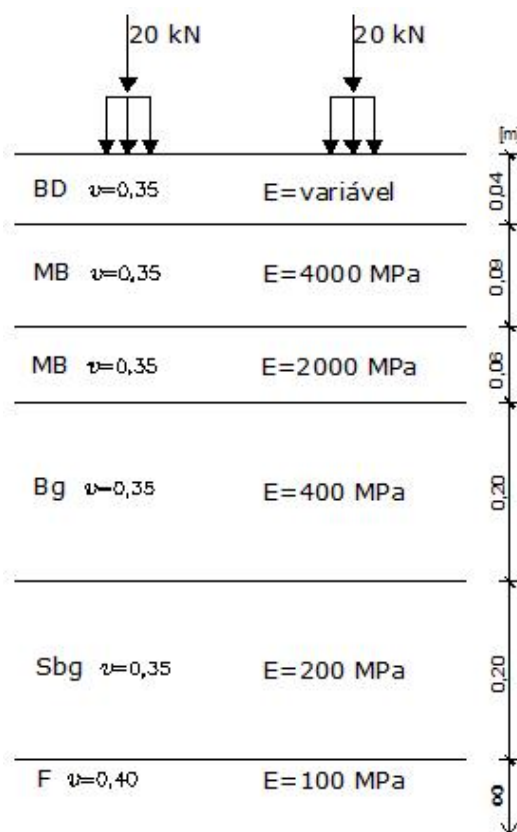


Figura 4-15: Esquema das estruturas G1, G2 e G3 (após reforço)

O Quadro 4-27 apresenta a vida útil para as várias estruturas G1, G2 e G3, após fresagem, reposição e aplicação do reforço.

Quadro 4-27: Extensões e vidas úteis das estruturas G1, G2 e G3

Estrutura alternativa	Fadiga				Deformação permanente	
	$\epsilon_{t1}$	$N_{adm}$ (milhões)	$\epsilon_{t2}$	$N_{adm}$ (milhões)	$\epsilon_z$	$N_{adm}$ (milhões)
G1 (Mistura convencional)	71,71	4028,4	119,8	458,5	191,2	78,5
G2 (MBR-BMB)	71,59	4062,2	120,3	449,0	192,3	76,8
G3 (MBA-BMB)	70,80	4294,0	125,5	363,4	204,3	60,3

A estrutura G1 apresenta um comportamento à fadiga ligeiramente superior à da estrutura de pavimento reabilitado com MBR-BMB (estrutura G2) e 6,6% superior à da estrutura com MBA-BMB (estrutura G3). Em termos de deformação permanente os resultados são semelhantes, revelando a solução convencional uma vida útil ligeiramente superior à da MBR-BMB em 2,2% e 30,2% superior à da MBA-BMB.

A vida útil é de 78,5 milhões de eixos-padrão para a mistura convencional, 76,8 milhões de eixos-padrão para a MBR-BMB e 60,3 milhões de eixos-padrão para a MBA-BMB, sendo a mistura convencional a que apresenta uma maior vida útil.

O Quadro 4-28 apresenta as vidas úteis para a estrutura base H.

Quadro 4-28: Extensões e vidas úteis da estrutura base H

Fadiga		Deformação permanente	
$\epsilon_t$	$N_{adm}$ (milhões)	$\epsilon_z$	$N_{adm}$ (milhões)
180,2	59,5	349,2	7,1

Assim, a vida útil restante, medida através do número acumulado de eixos-padrão de 80 kN admissível ( $N_{adm}$ ), nesta estrutura é determinado pelo Critério da Deformação Permanente, sendo o seu valor de apenas 7,1 milhões de eixos-padrão.

Devido à vida útil restante ser tão reduzida, percebe-se que este pavimento rodoviário está muito degradado. É então executada a fresagem parcial de 12 cm de camadas betuminosas e, de seguida, é realizada a reposição de 12 cm em duas camadas betuminosas e as três misturas betuminosas em estudo são aplicadas na camada de desgaste de 4 cm.

No Quadro 4-29 são apresentadas as características mecânicas e a Figura 4-16 apresenta o esquema do pavimento após a fresagem e reposição das camadas betuminosas para as estruturas H1, H2 e H3.

Quadro 4-29: Características das estruturas H1, H2 e H3, após fresagem e reposição

Camada	Espessura (cm)	E (MPa)	$\nu$	TVB (%)
Desgaste (a)	4	(b)	0,35	(b)
Reposição com (MBD)	5	4000	0,35	12,6
Reposição com (MB)	7	4000	0,35	11,6
Base (MB)	8	2000	0,35	10,0
Sub-base Granular	20	200	0,35	-
Fundação	$\infty$	100	0,40	-

(a) BD para a estrutura H1, MBR-BMB para a estrutura H2 e MBA-BMB para a estrutura H3;

(b) Depende do tipo de mistura da camada de desgaste (ver Quadro 4-2).

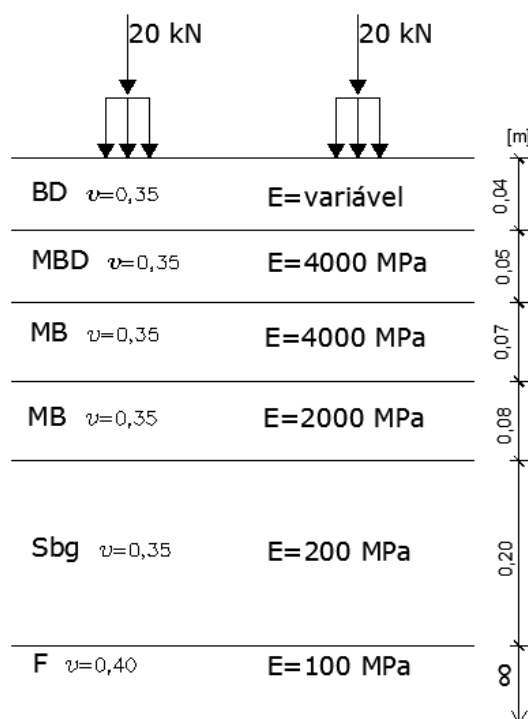


Figura 4-16: Esquema das estruturas H1, H2 e H3 (após reforço)

O Quadro 4-30 apresenta as vidas úteis de serviço para as várias misturas betuminosas.

Quadro 4-30: Extensões e vidas úteis das estruturas H1, H2 e H3

Estrutura alternativa	Fadiga				Deformação permanente	
	$\epsilon_{t1}$	$N_{adm}$ (milhões)	$\epsilon_{t2}$	$N_{adm}$ (milhões)	$\epsilon_z$	$N_{adm}$ (milhões)
H1 (Mistura convencional)	67,67	5383,3	123,2	398,6	236,0	33,8
H2 (MBR-BMB)	67,68	5379,3	123,8	389,0	237,6	32,9
H3 (MBA-BMB)	67,88	5300,5	131,1	292,1	255,3	24,7

A estrutura H1, com desgaste convencional, apresenta a maior vida útil das três alternativas, exibindo uma vida à fadiga superior à da MBR-BMB em 2,5% e 36,5% superior à da MBA-BMB. Ao nível da vida à deformação permanente os resultados são semelhantes, revelando a solução convencional uma vida útil ligeiramente superior à da MBR-BMB em 2,7% e 36,8% superior à da MBA-BMB.

A vida útil é de 33,8 milhões de eixos-padrão para a mistura convencional, 32,9 milhões de eixos-padrão para a MBR-BMB e 24,7 milhões de eixos-padrão para a MBA-BMB, sendo a mistura convencional que apresenta uma maior vida útil.

O Quadro 4-31 apresenta as vidas úteis de serviço para a estrutura base I.

Quadro 4-31: Extensões e vidas úteis da estrutura base I

Fadiga		Deformação permanente	
$\epsilon_t$	$N_{adm}$ (milhões)	$\epsilon_z$	$N_{adm}$ (milhões)
145,8	171,7	283,1	16,3

Assim, a vida útil restante, medida através do número acumulado de eixos-padrão de 80 kN admissível ( $N_{adm}$ ), nesta estrutura é determinado pelo Critério da Deformação Permanente, sendo o seu valor de 16,3 milhões de eixos-padrão.

Embora a vida útil restante seja razoável, sendo o pavimento de elevada espessura, é executada a fresagem parcial de 14 cm de camadas betuminosas, mais concretamente, as camadas de desgaste e de ligação e parte da camada de base. De seguida, é realizada a reposição de 14 cm em duas camadas betuminosas e as três misturas betuminosas em estudo são aplicadas na camada de desgaste de 4 cm.

No Quadro 4-32 são apresentadas as características mecânicas e a Figura 4-17 apresenta o esquema do pavimento após a fresagem e reposição das camadas betuminosas para as estruturas II.

Quadro 4-32: Características mecânicas da Estrutura I após fresagem e reposição

Camada	Espessura (cm)	E (MPa)	$\nu$	TVB (%)
Desgaste (a)	4	(b)	0,35	(c)
Reposição com MBD	6	4000	0,35	12,6
Reposição com MB	8	4000	0,35	11,6
Base (MB)	10	2000	0,35	10,0
Sub-base Granular	20	200	0,35	-
Fundação	$\infty$	100	0,40	-

- (a) BD para a estrutura I1, MBR-BMB para a estrutura I2 e MBA-BMB para a estrutura I3;  
 (b) Depende do tipo de mistura da camada de desgaste (ver Quadro 4-2).

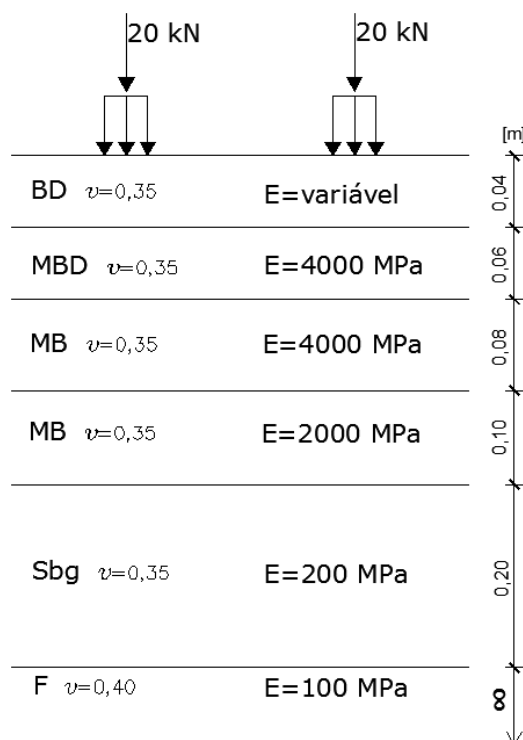


Figura 4-17: Esquema das estruturas I1, I2 e I3 (após reforço)

O Quadro 4-33 apresenta as vidas úteis de serviço para as várias misturas betuminosas após a fresagem e reposição.

Quadro 4-33: Extensões e vidas úteis das estruturas I1, I2 e I3

Estrutura alternativa	Fadiga				Deformação permanente	
	$\epsilon_{t1}$	$N_{adm}$ (milhões)	$\epsilon_{t2}$	$N_{adm}$ (milhões)	$\epsilon_z$	$N_{adm}$ (milhões)
I1 (Mistura convencional)	55,55	1925,5	100,4	147,9	193,9	74,3
I2 (MBR-BMB)	55,54	1927,2	100,8	145,0	195,1	72,5
I3 (MBA-BMB)	55,71	1898,0	106,3	111,1	208,4	55,7

A estrutura I1, com desgaste convencional, apresenta a maior vida útil das três alternativas, exibindo uma vida à fadiga superior à da MBR-BMB em 2,0% e 33,1% superior à da MBA-BMB. Ao nível da vida à deformação permanente os resultados são semelhantes, revelando a solução convencional uma vida útil ligeiramente superior à da MBR-BMB em 2,5% e 33,4% superior à da MBA-BMB.

A vida útil da Estrutura I é de 74,3 milhões de eixos-padrão para a mistura convencional, 72,5 milhões de eixos-padrão para a MBR-BMB e 55,7 milhões de eixos-padrão para a MBA-BMB, sendo a mistura convencional que apresenta uma maior vida útil.

Na Figura 4-18 apresenta-se um gráfico-síntese com os valores de vida útil das diferentes estruturas Gi, Hi e Ii. De referir que o critério condicionante foi sempre o de deformação permanente.

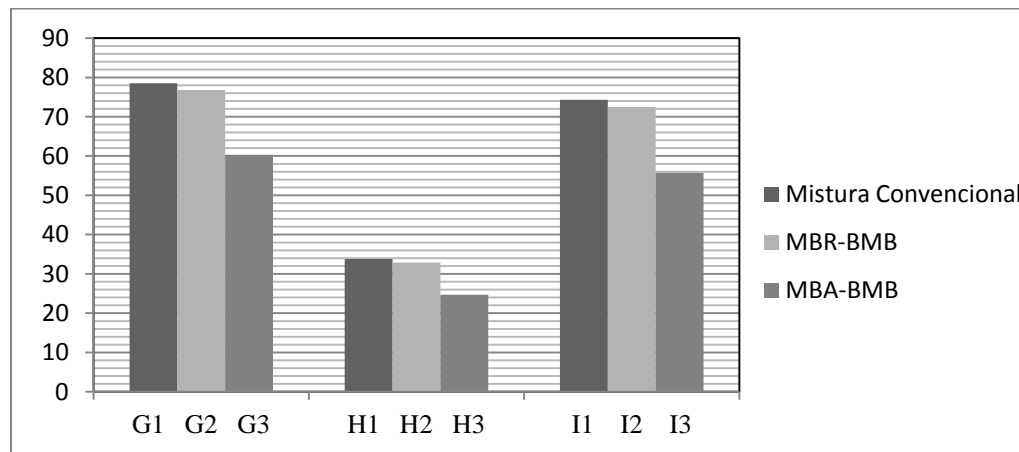


Figura 4-18: Síntese dos valores de vida útil para as estruturas Gi, Hi e Ii

## 4.6 Análise global dos resultados

Nesta secção são apresentados os valores de vida útil para todas as estruturas e justificam-se os resultados a que se chegou. O Quadro 4-34 apresenta os valores para a vida útil à fadiga, expressa em milhões de eixo-padrão, para todos os casos de estudo de aplicação.

Quadro 4-34: Vida útil à fadiga dos casos de estudo

Estrutura	Mistura Convencional (milhões)	MBR-BMB (milhões)	MBA-BMB (milhões)
Estrutura A	114,5	112,6	93,1
Estrutura B	131,1	128,4	97,8
Estrutura C	421,4	412,2	320,1
Estrutura D	317,8	313,6	266,4
Estrutura E	312,2	306,7	238,4
Estrutura F	882,5	864,8	682,5
Estrutura G	458,5	449,0	363,4
Estrutura H	398,6	389,0	292,1
Estrutura I	147,9	145,0	111,1

No estudo de aplicação, para a fadiga, nas nove estruturas estudadas e das três misturas betuminosas em estudo, a mistura convencional demonstrou nas nove estruturas um comportamento melhor que as outras duas misturas betuminosas, tendo em média um comportamento superior à da MBR-BMB em 2,0% e à da MBA-BMB em 29,6%.

Tendo em conta que o módulo de deformabilidade da mistura convencional (4000 MPa) é superior aos módulos de deformabilidade da MBR-BMB e da MBA-BMB, 3800 MPa e 2000 MPa, tal reflectiu-se inevitavelmente nos resultados do cálculo das extensões utilizadas na avaliação da vida à fadiga e que foi sempre condicionada pela extensão máxima de tracção na base das camadas betuminosas.

O Quadro 4-35 apresenta os valores para a vida útil à deformação permanente, expressa em milhões de eixos-padrão, para todos os casos em estudo.

Quadro 4-35: Vida útil à deformação permanente dos casos de estudo

Estrutura	Mistura convencional (milhões)	MBR-BMB (milhões)	MBA-BMB (milhões)
Estrutura A	41,8	40,8	31,1
Estrutura B	21,8	21,2	15,3
Estrutura C	56,6	55,1	41,3
Estrutura D	80,6	78,7	60,5
Estrutura E	38,2	37,2	27,5
Estrutura F	85,5	83,3	63,0
Estrutura G	78,5	76,8	60,3
Estrutura H	33,8	32,9	24,7
Estrutura I	74,3	72,5	55,7

No estudo de aplicação, para a deformação permanente, nas nove estruturas estudadas e das três misturas betuminosas em estudo, a mistura convencional foi sempre a que demonstrou um comportamento melhor, tendo em média um comportamento superior à da MBR-BMB em 2,5% e à da MBA-BMB em 34,7%.

Tal como se referiu a propósito da vida à fadiga, sendo o módulo de deformabilidade da mistura convencional superior aos módulos das misturas com borracha, tal reflectiu-se inevitavelmente nos resultados do cálculo das extensões utilizadas na avaliação da vida à deformação permanente.

No estudo de aplicação, a deformação permanente foi determinante na vida útil de todas as estruturas estudadas. Nas nove estruturas estudadas e das três misturas betuminosas em estudo (27 casos), a mistura convencional conduziu em todas as situações a uma vida útil do pavimento superior ao proporcionado pelas outras alternativas, tendo em média um comportamento superior à da MBR-BMB em 2,5% e à da MBA-BMB em 25,8%.

APLICAÇÃO DE MISTURA BETUMINOSA ABERTA COM BETUME MODIFICADO COM ALTA INCORPORAÇÃO DE BORRACHA NA REABILITAÇÃO DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS

## 5. Conclusão e trabalhos futuros

### 5.1 Conclusões

Com o desenvolvimento do presente trabalho pretendia-se aprofundar o estudo da aplicação de misturas betuminosas com betume modificado com borracha (MB-BMB) na reabilitação de pavimentos rodoviários flexíveis.

Para isso, foram abordadas alguns assuntos associados ao tema em estudo. Assim, no segundo capítulo são tratadas as matérias relacionadas com o dimensionamento e a reabilitação de pavimentos rodoviários flexíveis. No capítulo 3 tratou-se essencialmente do estudo das MB-BMB. Entre outros aspectos, foi dado enfoque aos materiais constituintes, aos diferentes tipos de misturas e aos principais processos de produção do BMB.

No âmbito do trabalho, foram ainda efectuadas simulações de aplicação de MB-BMB em camada de desgaste de pavimentos novos ou em camada de reforço de pavimentos com necessidade de reabilitação. Como se verificou, nas condições estudadas, as estruturas com aplicação de misturas do tipo MB-BMB conduzem a uma vida útil do pavimento regra geral inferior às estruturas com misturas tradicionais.

Vários autores, como por exemplo Sousa *et al.* (1999), Antunes *et al.* (2000), Shatnawi *et al.* (2000), Visser *et al.* (2000), Shatnawi *et al.* (2003) e Neto (2004), demonstraram, através de ensaios de fadiga, que as misturas betuminosas produzidas com betume modificado com borracha apresentam uma resistência à fadiga significativamente superior às misturas betuminosas convencionais. Segundo estes autores, isso deve-se à maior flexibilidade causada pela incorporação do granulado de borracha no betume utilizado nas misturas betuminosas.

Os resultados dos ensaios de laboratório realizados pelos mesmos mostram que as misturas betuminosas com BMB apresentam um desempenho mecânico superior, quanto à ruína por fadiga, quando comparado com a(s) mistura(s) convencional(is). Assim, considerando o uso de MB-BMB substituindo a mistura convencional, na camada de desgaste, é possível obter-se uma redução considerável da espessura desta camada. É assim assumido e aceite que as misturas com BMB apresentam uma vida à fadiga muito superior à das misturas tradicionais.

Tomando como referência os resultados obtidos por alguns autores e entidades, como, por exemplo, Caltrans (1992), Salini (2000), Recipav (2007) e Fontes *et al.* (2009), pode concluir-se que um reforço com uma mistura do tipo MB-BMB pode assegurar uma redução até 50% da sua espessura, comparativamente, a uma solução de reforço tradicional em betão betuminoso.

Tal não deixa de estar correto em pavimentos com necessidade de reabilitação, que não apresentem patologias que indiquem problemas de deformação permanente com origem nas camadas não ligadas e desde que seja implementada uma solução que evite a propagação do fendilhamento existente ao nível das camadas betuminosas degradadas.

Todavia, no presente estudo tal não foi admitido nas estruturas com necessidade de reabilitação. Como se constatou, nas hipóteses consideradas, quer nos pavimentos novos quer nos pavimentos com necessidade de reabilitação, as conclusões foram muito semelhantes, tendo-se verificado que a MBR-BMB conduziu a uma vida útil do pavimento muito próxima da solução tradicional com betão betuminoso em camada de desgaste.

Porém, a MBA-BMB revelou uma vida útil manifestamente inferior ao da solução tradicional de referência. Convém referir que, atendendo aos valores considerados para o módulo de deformabilidade das três alternativas admitidas para camada de desgaste/reforço, era espectável que a vida útil das estruturas não fosse muito diferente daquele a que se chegou.

## **5.2 Sugestões para trabalhos futuros**

Um trabalho de investigação é um processo dinâmico e nunca é um trabalho acabado. Na área das MB-BMB há muito trabalho a desenvolver no futuro. De modo a poder confirmar as conclusões a que se chegou, convinha avaliar a vida útil de pavimentos com aplicação de MB-BMB noutras condições de fundação e tipos de pavimentos.

A nível experimental, interessaria realizar ensaios mecânicos de desempenho de modo a ter um conhecimento mais aprofundado das características das MB-BMB. Outra hipótese seria fazer o estudo comparativo de MB-BMB produzidas através de diferentes técnicas de mistura (processos húmido e seco), de modo a perceber-se as diferenças no seu comportamento.

Ainda no âmbito de trabalhos experimentais, seria interessante acompanhar obras de pavimentação com MB-BMB e fazer o estudo da aplicabilidade/possibilidade da reciclagem sob duas formas: com a utilização de materiais fresados provenientes de pavimentos com MB-BMB na produção de novas misturas betuminosas; com a utilização de materiais fresados de pavimentos com misturas convencionais ou modificadas na produção de MB-BMB.

APLICAÇÃO DE MISTURA BETUMINOSA ABERTA COM BETUME MODIFICADO COM ALTA INCORPORAÇÃO DE BORRACHA NA REABILITAÇÃO DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS

## ANEXO A - Especificações de betumes

- **Betumes convencionais:**

Quadro A-1: Tipos de betume de pavimentação, propriedades e exigências de conformidade (LNEC, 1997)

Propriedades [Condições de apoio]		Tipos de betumes e exigências de conformidades								
		Tipos	10/ 20	20/ 30	35/ 50	50/ 70	70/ 100	100/ 150	160/ 220	250/ 330
Penetração (0,1 mm) [25 °C, 100 g, 5 s]		Mín.	10	20	35	50	70	100	160	250
		Máx.	20	30	50	70	100	150	220	330
Temperatura de amolecimento (°C)		Mín.	63	55	50	46	43	39	35	30
		Máx.	76	63	58	54	51	47	43	38
Viscosidade cinemática (mm <sup>2</sup> /s) [135 °C]		Mín.	1000	530	370	295	230	175	135	100
Solubilidade em tolueno ou xileno (%)		Mín.	99	99	99	99	99	99	99	99
Temperatura de inflamação (°C)		Mín.	250	240	240	230	230	230	220	220
Resistência ao endurecimento	Variação de massa (% , ±)	Máx.	0,5	0,5	0,5	0,5	0,8	0,8	1,0	1,0
	Penetração (% p.o. <sup>(1)</sup> ) [25 °C, 100 g, 5 s]	Mín.	60	55	53	50	46	43	37	35
	Temperatura de amolecimento (°C)	Mín.	65	57	52	48	45	41	37	32
	Aumento da temperatura de amolecimento (°C)	Máx.	8	10	11	11	11	12	12	12

<sup>(1)</sup> penetração do betume original.

APLICAÇÃO DE MISTURA BETUMINOSA ABERTA COM BETUME MODIFICADO COM ALTA INCORPORAÇÃO DE BORRACHA NA REABILITAÇÃO DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS

• **Betumes modificados com borracha:**

Quadro A-2: Especificações a respeitar para os betumes modificados com borracha  
(Norma Europeia EN 12591:1999)

Propriedade	Unidade	BBB 35/50	BBB 50/70	BBM 35/50	BBM 50/70	BBA 35/50	BBA 50/70
Penetração, a 25 °C, 100 g, 5 s	0,1 mm	35/50	50/70	35/50	50/70	35/50	50/70
Temperatura de amolecimento, mínima	°C	58	53	65	58	68	65
Ponto de fragilidade de Fraass, máximo	°C	-5	-8	-8	-10	-4	-8
Viscosidade cinemática, a 135 °C, mínima	mm <sup>2</sup> /s	250	295	-	-	-	-
Viscosidade dinâmica, a 175 °C, mínima	mPa.s	310	150	310	150	2500 a 4500	2500 a 4500
Variação de massa após RTFOT, 163 °C, máxima	%	+1,0	+1,0	+0,8	+1,0	+0,8	+0,8
Variação da penetração retida após RTFOT, 163 °C, a 25 °C, 100 g, 5 s, mínima	%	65	60	70	65	60	60
Variação da temperatura de amolecimento após RTFOT, 163 °C, mínima	°C	-4	-5	-4	-5	-	-
Variação da temperatura de amolecimento após RTFOT, 163 °C, máxima	°C	+8	+10	+8	+10	+12	+12

Quadro A-2 (continuação): Especificações a respeitar para os betumes modificados com borraça (Norma Europeia EN 12591:1999)

Propriedade	Unidade	BBB 35/50	BBB 50/70	BBM 35/50	BBM 50/70	BBA 35/50	BBA 50/70
Estabilidade ao armazenamento, diferença no valor da temperatura de amolecimento, máxima	°C	10	10	5	5	-	-
Estabilidade ao armazenamento, diferença no valor da penetração, máxima	0,1 mm	8	10	8	10	-	-
Recuperação elástica, alongamento 20 cm, a 25 °C, mínima	%	10	10	15	20	75 <sup>(1)</sup>	75 <sup>(1)</sup>
Temperatura de inflamação, mínima	°C	235	235	235	235	235	235

<sup>(1)</sup> Recuperação elástica, alongamento 10 cm, a 25 °C.

Quadro A-3: Requisitos físicos para o betume modificado com borracha da norma ASTM D 6114-97 (2002) (ASTM, 2002)

Propriedade	Unidade	Limite	Norma	Designação do aglutinante		
				Tipo I	Tipo II	Tipo III
Viscosidade dinâmica, a 175 °C	cP	Mín.	D 2196	1500	1500	1500
Viscosidade dinâmica, a 175 °C	cP	Máx.	D 2196	5000	5000	5000
Penetração, a 25 °C, 100 g, 5 s	0,1 mm	Mín.	D 5	25	25	50
Penetração, a 25 °C, 100 g, 5 s	0,1 mm	Máx.	D 5	75	75	100
Penetração, a 4 °C, 200g, 60s	0,1 mm	Mín.	D 5	10	15	25
Temperatura de amolecimento	°C	Mín.	D 36	57,2	54,4	51,7
Recuperação elástica, a 25 °C	%	Mín.	D 5329	25	20	10
Temperatura de inflamação	°C	Mín.	D 93	232,2	232,2	232,2
TFOT		-	D 1754	-	-	-
Penetração retida, a 25 °C, 100g, 5s	%	Mín.	D 5	75	75	75

De acordo com a norma ASTM D 6114-97 (2002) (ASTM, 2002), existem três tipos de ligante a utilizar em zonas com determinadas condições climáticas.

Os aglutinantes do Tipo I, tipicamente, incluem os ligantes betuminosos mais duros. Geralmente, são recomendados para utilização em regiões de clima quente, como demonstrado com as seguinte condições:

- Temperatura ambiente média mensal máxima de 43 °C ou superior;
- Temperatura ambiente média mensal mínima de -1 °C ou superior.

Os aglutinantes do Tipo II, normalmente, incluem ligantes betuminosos mais moles do que os aglutinantes do Tipo I. Geralmente, são recomendados para utilização em regiões de clima temperado, como demonstrado com as seguintes condições:

- Temperatura ambiente média mensal máxima de 43 °C ou inferior;
- Temperatura ambiente média mensal mínima de -9 °C ou superior.

Os aglutinantes do Tipo III, geralmente, incluem os ligantes betuminosos mais moles disponíveis e, podem precisar de aditivos para alcançar as propriedades físicas especificadas.

Normalmente, são recomendados para utilização em regiões de clima frio, como demonstrado com as seguintes condições:

- Temperatura ambiente média mensal máxima de 27 °C ou inferior;
- Temperatura ambiente média mensal mínima de -9 °C ou inferior.

• **Betumes modificados com borracha da Recipav:**

Quadro A-4: Propriedades do BMB® (LNEC, 2008)

Propriedades [Condições de apoio]	Método de ensaio	Valores nominais declarados pelo fabricante (1)	
		Betume base 35/50	Betume base 50/70
Viscosidade aparente (mPa.s) [175 °C] (2)	EN 13302: 2003	2500 a 4500	
Penetração (0,1 mm) [25 °C, 100g, 5s]	EN 1426: 1999	15 a 30	20 a 35
Temperatura de amolecimento pelo método de anel e bola (°C)	EN 1427: 1999	≥ 68	≥ 65
Resistência ao endurecimento pelo método RTFOT (3), [163 °C]	EN 12607-1: 1999	Variação da massa (%)	
		≤ 0,8	
		Penetração retida (%) [25 °C, 100g, 5s]	
		≥ 60	
		Aumento da temperatura de amolecimento (°C)	
		≤ 12	
Recuperação elástica (%) [25 °C]	EN 13398:2003 modificada, para um alongamento de 10 cm	≥ 75	

(1) Resultados confirmados através de ensaios realizados no LNEC.

(2) Viscosímetro Brookfield, com thermosel, haste SC4-27, 2 0 rpm.

(3) Endurecimento por acção do calor e do ar numa película fina de betume em movimento, RTFOT.

- **Betumes modificados com borracha da Cepsa:**

Quadro A-5: Características dos betumes modificados com borracha (Cepsa, 2007)

Propriedades [Condições de ensaio]		Método de ensaio		Betumes modificados com borracha (BB)					
				BBB 35/50	BBB 50/70	BBM 35/50	BBM 50/70	BBA 35/50	BBA 50/70
Penetração (0,1 mm) [25 °C; 100g; 5s]		EN 1426	Mín.	35	50	35	50	35	50
			Máx.	50	70	50	70	50	70
Temperatura de amolecimento (°C)		EN 1427	Mín.	58	53	65	58	68	65
Ponto de fragilidade de Fraass (°C)		EN 12593	Máx.	-5	-8	-8	-10	-4 <sup>(1)</sup>	-8 <sup>(1)</sup>
Viscosidade cinemática (mm <sup>2</sup> /s) [135 °C]		EN 12595	Mín.	370	295	-	-	-	-
Viscosidade (mPa.s) [175 °C]		EN 13302	Mín.	-	-	310	150	2500	2500
			Máx.	-	-	-	-	4500	4500
Resistência ao endurecimento [RFTOT; 163 °C]	$\Delta m$ (%) <sup>(2)</sup>	EN 12607-1	Máx.	1,0	1,0	0,8	1,0	0,8	0,8
	% p.o. <sup>(3)</sup>		Mín.	65	60	70	65	60	60
	$\Delta Tab$ (°C) <sup>(4)</sup>		Mín.	-4	-5	-4	-5	-	-
			Máx.	+8	+10	+8	+10	+12	+12
Estabilidade ao armazenamento	Dpen <sup>(5)</sup> ou DTab <sup>(6)</sup>	EN 13399	Máx.	5	5	5	5	-	-
			Máx.	10	10	8	10	-	-
Recuperação elástica (%) [AI 20 cm; 25 °C]		EN 13389	Mín.	10	10	15	20	-	-
Recuperação elástica (%) [AI 10 cm; 25 °C]			Mín.	-	-	-	-	75	75

<sup>(1)</sup> Valor indicativo;

<sup>(2)</sup> Variação da massa;

<sup>(3)</sup> Variação de penetração: percentagem relativa à penetração original;

<sup>(4)</sup> Variação da temperatura de anel e bola;

<sup>(5)</sup> Diferença no valor da penetração (0,1 mm);

<sup>(6)</sup> Diferença no valor da temperatura de amolecimento (°C).

APLICAÇÃO DE MISTURA BETUMINOSA ABERTA COM BETUME MODIFICADO COM ALTA INCORPORAÇÃO DE BORRACHA NA REABILITAÇÃO DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS

Quadro A-6: Betume borracha BMB-2 (Cepsa, 2010)

Propriedades		Norma	Unidade	Mín.	Máx.
Penetração (25 °C, 100g, 5s)		EN 1429	0,1 mm	35	50
Temperatura de amolecimento		EN 1427	°C	58	-
Ponto de fragilidade de Fraass		NLT 182	°C	-	-5
Recuperação elástica, a 25 °C		NLT 329	%	10	-
Estabilidade ao armazenamento	DTab <sup>(1)</sup>	NLT 125	°C	-	10
	Dpen <sup>(2)</sup>	NLT 124	0,1 mm	-	8
Resistência ao envelhecimento	Varição de massa	NLT 185	%	-	1
	Penetração retida		%	65	-
	Varição da temperatura de anel e bola	NLT 125	°C	-4	+8
	Viscosidade aparente, a 175 °C	EN 13302	mPa.s	310	-

<sup>(1)</sup> Diferença no valor da temperatura de amolecimento;

<sup>(2)</sup> Diferença no valor da penetração (0,1 mm).

Quadro A-7: Betume borracha BMB-3b da Cepsa (Cepsa, 2010)

Propriedades		Norma	Unidade	Mín.	Máx.
Penetração (25 °C, 100g, 5s)		EN 1429	0,1 mm	50	70
Temperatura de amolecimento		EN 1427	°C	53	-
Ponto de fragilidade de Fraass		NLT 182	°C	-	-8
Recuperação elástica, 25 °C		NLT 329	%	10	-
Estabilidade ao armazenamento	DTab <sup>(1)</sup>	NLT 125	°C	-	10
	Dpen <sup>(2)</sup>	NLT 124	0,1 mm	-	8
Resistência ao envelhecimento	Varição de massa	NLT 185	%	-	1
	Penetração retida		%	60	-
	Varição da temperatura de anel e bola	NLT 125	°C	-5	+10
	Viscosidade aparente, a 175 °C	EN 13302	mPa.s	150	-

<sup>(1)</sup> Diferença no valor da temperatura de amolecimento;

<sup>(2)</sup> Diferença no valor da penetração (0,1 mm).

- **Betumes modificados com borracha da Galp:**

Quadro A-8: Características dos betumes modificados com borracha da Galp  
(Probigalp, 2010)

Propriedades	Norma	Unidade	Viambiente BBB		Viambiente BBM		Viambiente BBA		
			35/50	50/70	35/50	50/70	15/30 <sup>(1)</sup>	20/35 <sup>(2)</sup>	
Penetração (25 °C, 100g, 5s)	EN 1426	0,1 mm	35 - 50	50 - 70	35 - 50	50 - 70	15 - 30	20 - 35	
Temperatura de amolecimento	EN 1427	°C	≥ 58	≥ 53	≥ 65	≥ 58	≥ 68	≥ 65	
Resistência ao envelhecimento a 163 °C, RTFOT									
Varição da massa	EN 12607-1	%	≤ +1,0	≤ +1,0	≤ +0,8	≤ +1,0	≤ +0,8	≤ 0,8	
Penetração retida (25 °C, 100g, 5s)	EN 12607-1	%	≥ 65	≥ 60	≥ 70	≥ 65	≥ 60	≥ 60	
Varição da temp. de amolecimento	EN 12607-1	°C	≥ -4	≥ -5	≥ -4	≥ -5	≥ -12	≥ -12	
			≤ +8	≤ +10	≤ +8	≤ +10	≤ +12	≤ +12	
Outras propriedades									
Viscosidade dinâmica (175 °C)	EN 12595	mPa.s	≥ 250	≥ 150	≥ 300	≥ 250	2500 - 4500	2500 - 4500	
Ponto de fragilidade de Fraass	EN 12593	°C	≤ -5	≤ -8	≤ -8	≤ -10	A declarar pelo produtor		
Estabilidade ao armazenamento	DTab <sup>(3)</sup>	EN 13399	°C	≤ 10	≤ 10	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5
	Dpen <sup>(4)</sup>	EN 13399	0,1 mm	≤ 8	≤ 10	≤ 8	≤ 10	≤ 8	≤ 10
Recuperação elástica, 20 <sup>(5)</sup> cm, 25 °C	EN 13398	%	≥ 10	≥ 10	≥ 15	≥ 20	≥ 75	≥ 75	
Temperatura de inflamação	EN ISSO 2592	°C	≥ 235	≥ 235	≥ 235	≥ 235	≥ 235	≥ 235	

<sup>(1)</sup> O BBA 15/30 quando fabricado *in situ* o betume base é um betume de pavimentação 35/50;

<sup>(2)</sup> O BBA 20/35 quando fabricado *in situ* o betume base é um betume de pavimentação 50/70;

<sup>(3)</sup> Diferença no valor da temperatura de amolecimento;

<sup>(4)</sup> Diferença no valor da penetração (0,1 mm);

<sup>(5)</sup> 10 cm no caso dos BBA.

Caracterização dos Betumes Viambiente<sup>®</sup>:

- a) Betume Borracha de Baixa percentagem de granulado de borracha (BBB) - betume fabricado com uma percentagem de granulado de borracha igual ou inferior a 8%, em relação à massa total de ligante. Produzido em fábrica ou no local da produção das misturas betuminosas (*in situ*), é um betume de baixa viscosidade;
- b) Betume Borracha de Média percentagem de granulado de borracha (BBM) - betume modificado com uma percentagem de granulado de borracha entre 10 a 14%, em relação à massa total de ligante. produzido em fábrica ou no local da produção das misturas betuminosas (*in situ*), é um betume de média viscosidade;
- c) Betume Borracha de Alta percentagem de granulado de borracha (BBA)<sup>®</sup> - betume modificado com uma percentagem de granulado de borracha igual ou superior a 18%, em relação à massa total de ligante. Geralmente, produzido no local da produção das misturas betuminosas (*in situ*), é um betume de alta viscosidade.

## ANEXO B - Especificações de MB-BMB

Quadro B-1: Propriedades relacionadas com o desempenho estrutural de MBR-BMB<sup>®</sup>  
(LNEC, 2008)

Característica		Método de ensaio <sup>(1)</sup>		Unidade	Valores nominais declarados pelo fabricante <sup>(2)</sup>	
		Norma de ensaio	Condições específicas de ensaio		Betume base 35/50	Betume base 50/70
Módulo de deformabilidade		EN 12697-26:2004	Flexão em 4 pontos; Temperatura: 20 °C; Frequência de carregamento: 10 Hz Extensão de tracção: $50 \times 10^{-6}$ m/m	MPa	3000 a 4500	2500 a 3500
Resistência à fadiga	Diferença entre os valores de pico da extensão, correspondente a uma vida à fadiga de $1 \times 10^6$ ciclos	AASHTO TP8-94	Flexão em 4 pontos; Temperatura: 20 °C; Frequência de carregamento: 10 Hz	µm/m	≥ 400	≥ 500
	Extensão correspondente a uma vida à fadiga de $1 \times 10^6$ ciclos, $\epsilon^6$	EN 12697-24:2004	Flexão em 4 pontos; Temperatura: 20 °C; Frequência de carregamento: 10 Hz	µm/m	≥ 200	≥ 250
	Inclinação da curva de fadiga, $p$			-	- 4 a - 6	
Resistência à deformação permanente	Velocidade de deformação entre 105 min. e 120 min.	NLT-173/84	Ensaio de simulação em pista de laboratório; Temperatura: 60 °C	µm/min	≤ 10	≤ 14
	Taxa de deformação em ensaio de pista, $WTS_{AIR}$	EN 12697-22:2003	Ensaio de pista; Equipamento pequeno; Procedimento B; Acondicionamento ao ar; Temperatura: 60 °C	mm/10 <sup>3</sup> ciclos de carga	≤ 0,08	≤ 0,09
	Porcentagem de profundidade de rodeira, $PRD_{AIR}$			%	≤ 6,0	≤ 7,0

<sup>(1)</sup> Para a realização dos ensaios utilizaram-se provetes recolhidos em obra e provetes moldados em laboratório com compactador de rolo;

<sup>(2)</sup> Resultados confirmados em ensaios realizados pelo LNEC.

APLICAÇÃO DE MISTURA BETUMINOSA ABERTA COM BETUME MODIFICADO COM ALTA INCORPORAÇÃO DE BORRACHA NA REABILITAÇÃO DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS

Quadro B-2: Propriedades relacionadas com o desempenho estrutural de MBA-BMB®  
(LNEC, 2006)

Característica		Método de ensaio <sup>(1)</sup>		Unidade	Valores nominais declarados pelo fabricante <sup>(2)</sup>	
		Norma de ensaio	Condições específicas de ensaio		Betume base 35/50	Betume base 50/70
Módulo de deformabilidade		EN 12697-26: 2004	Flexão em 4 pontos; Temperatura: 20 °C; Frequência de carregamento: 10 Hz	MPa	1500 – 2500	1000 – 2000
Resistência à fadiga	Extensão correspondente a uma vida à fadiga de $1 \times 10^6$ ciclos, $\epsilon^6$	EN 12697-24: 2004	Flexão em 4 pontos; Temperatura: 20 °C; Frequência de carregamento: 10 Hz	$\mu\text{m}/\text{m}$	$\geq 450$	$\geq 500$
	Declive da curva de fadiga, $p$			-	4 – 5	
Resistência às deformações permanentes	Deformação final (120 min.)	NLT-173/84 <sup>2</sup>	Ensaio de simulação em pista de laboratório; Temperatura: 60 °C	mm	$\leq 5$	$\leq 10$
	Velocidade de deformação entre 105 min. e 120 min.			$\mu\text{m}/\text{min.}$	$\leq 12$	$\leq 24$

<sup>(1)</sup> Resultados confirmados em ensaios realizados pelo LNEC;

<sup>(2)</sup> Para a realização deste ensaio utilizaram-se provetes recolhidos em obra e provetes moldados em laboratório com um cilindro compactador.

## ANEXO C - Estudo da redução de ruído

Segundo Recipav (2007), a poluição sonora constitui um dos principais problemas ambientais sentidos pelas pessoas. Hoje em dia, estima-se que mais de 40% da população europeia, esteja sujeita a um nível de ruído provocado pelo tráfego rodoviário, superior a 55 dB e 20% a níveis superiores a 65 dB. Durante a noite, 30% da população estará exposta a níveis que excedem os aconselhados 55 dB.

O ruído provocado por um veículo tem fundamentalmente três componentes: a originada pelo motor, o efeito aerodinâmico e o contacto do pneu com o pavimento (Freitas *et al.*, 2006; ISO, 1997).

A velocidade de circulação condiciona a contribuição de cada uma das componentes para o ruído originado pelo veículo. A baixas velocidades (até aos 50 km/h) predomina o efeito do ruído do motor, enquanto que para altas velocidades (superiores a 100 km/h), tendo por esta razão uma maior importância fora das localidades (Sandberg *et al.*, 2002), como no caso das auto-estradas, o efeito do contacto do pneu com o pavimento é a principal causa do ruído. O ruído aerodinâmico só começa a ser relevante para velocidades muito superiores às velocidades normais de circulação rodoviária (superiores a 180 km/h).

Os mecanismos de geração de ruído associados à interacção do pneu com o pavimento referem-se às vibrações, resultantes do impacto dos pneus na superfície e da aderência, e ao deslocamento de ar que envolve o pneu (Sandberg *et al.*, 2002). Estes são amplificados devido ao efeito de *horn* e podem ser amplificados ou atenuados em função da impedância acústica e mecânica da superfície e da ressonância dos pneus.

Os mecanismos referidos são influenciados pelo comportamento dos condutores (através do controlo da velocidade e da pressão dos pneus), pelas características dos pneus (estrutura, dimensão, rigidez da borracha, relevo, desgaste e idade), pelas características da superfície do pavimento (macro e microtextura, cor, irregularidade, porosidade, rigidez, idade, desgaste e presença de água) e pelo clima (temperatura e vento).

Por exemplo, a presença de água na superfície dos pavimentos, em função da sua quantidade, do tipo de superfície, do tipo de veículo, das condições de circulação, entre outros factores, pode aumentar o nível de ruído emitido pelos veículos até 15 dB (Descornet *et al.*, 2000). Este aumento parece ser determinado pelas frequências altas, como se pode constatar em (Sandberg *et al.*, 2002).

A redução dos níveis sonoros originados pelo tráfego rodoviário pode ser obtida através de três formas: na fonte (emissão dos veículos), na recepção (isolamento de fachadas) ou no percurso de propagação do ruído (barreiras acústicas).

Assim, torna-se importante o desenvolvimento de soluções que visem reduzir os níveis de ruído próprios dos mecanismos de contacto dos pneus dos veículos com a superfície da via, através da utilização de pavimentos em que a camada de desgaste possui características de baixa emissão sonora.

A experiência americana revela que, actuando ao nível do pavimento com a colocação de misturas betuminosas com BMB, pode reduzir-se, e em alguns casos, eliminar-se, a necessidade de colocação de barreiras acústicas.

Portanto, a redução do ruído do rolamento dos pneus é outro benefício importante da utilização de BMB, que tem sido documentado na Europa (Bélgica, França, Alemanha, Áustria, Países Baixos), Canadá e nos EUA – Arizona (Quiet Pavements Program) e Califórnia (municípios de Orange, de Los Angeles e de Sacramento).

Uma redução significativa do ruído do tráfego, variando entre 40% a 88%, não só para mistura aberta, mas também para MB-BMB de mistura fechada. No entanto, existem muitas questões sem resposta sobre quanto tempo a redução do ruído continuaria. O Departamento de Revisão Ambiental e Avaliação do Condado de Sacramento e um consultor especializado em acústica e controlo de ruído realizaram um estudo de seis anos em pavimentos com BMB, que foi concluído em 1999. Os seus resultados sustentaram as descobertas de outros estudos semelhantes referenciados no seu relatório. O estudo de Sacramento demonstrou que o pavimento com BMB continuou a manter o nível de ruído do tráfego baixo depois de seis anos, enquanto o nível de ruído medido no pavimento com betume convencional voltou aos níveis de pré-pavimentação após quatro anos.

Os estados da Califórnia e do Arizona estão a participar de um projecto da FHWA de 10 anos para estudar os níveis de ruído de uma variedade de pavimentos.

Segundo Recipav (2007), nos estudos efectuados para o efeito nos EUA e em Portugal, é de admitir uma redução do ruído de contacto do pneu com o pavimento de 6 a 8 dB. Para se compreender o que representa uma redução desta ordem, pode-se afirmar, que para se obter uma redução do ruído de circulação de 3 dB teria que se reduzir em 50% o tráfego de uma dada estrada.

Guerra *et al.* (2005) realizou este estudo na A8 – Auto-Estrada do Oeste entre Lisboa e Caldas da Rainha. Esta começou a ser construída no final dos anos 80 com troços em pavimento

rígido e pavimento flexível. Existe ainda um troço, construído a título experimental, com MB-BMB. Posteriormente, em 2003, alguns troços foram repavimentados com MB-BMB.

Recorreu-se à utilização de "pavimentos drenantes", e mais recentemente à utilização de pavimentos integrando betume modificado com borracha reciclada de pneus.

Para avaliar os níveis de ruído, efectuaram-se ensaios acústicos na A8 para comparação do ruído gerado nos pavimentos flexíveis utilizando betume modificado com borracha reciclada de pneus (BMB), nos pavimentos rígidos de betão armado contínuo (BAC) e nos pavimentos flexíveis em betão betuminoso tradicional (BB).

As medições dos níveis sonoros LAeq, em dB, junto de cada secção de pavimento em análise, através de amostragens com duração de 30 minutos, foram realizadas seguindo os procedimentos da normalização aplicável em vigor, a NP 1730, 1996 – Acústica: Descrição e medição do ruído ambiente.

A metodologia dos ensaios teve por base a medição simultânea dos níveis sonoros captados à mesma distância da via, em zonas com pavimentos diferentes (BMB vs. BAC e BMB vs. BB), mas onde o tráfego apresentasse as mesmas características (os mesmos veículos, à mesma velocidade).

▪ Para o ensaio do pavimento BMB versus BAC:

Foram seleccionados vários troços onde fosse possível a recolha simultânea de dados acústicos correspondentes à circulação rodoviária nos dois tipos de pavimento em ensaio, e que cumprissem os seguintes requisitos:

- a) Mesmas características do tráfego nas secções de pavimento em comparação (veículos iguais e mesmo volume de tráfego, velocidades e relação de caixa semelhantes);
- b) Velocidade dos veículos elevada (superior a 100 km/h) e constante (sem acelerações ou travagens);
- c) Tráfego contínuo e regular;
- d) Local em campo aberto para evitar o efeito de reflexões sonoras;
- e) Ausência de outras fontes de ruído relevantes além do tráfego na via em análise.

Efectuaram-se cinco ensaios comparativos, em datas e locais distintos.

As medições foram efectuadas em secções adjacentes da via abrangendo os dois tipos de pavimentos em análise, à mesma distância da berma, e em posições próximas desta para que os níveis sonoros registados não sofressem a influência de factores estranhos aos mecanismos de geração do ruído de tráfego, tais como a acção do vento, da humidade ou da temperatura do ar, a absorção sonora do terreno, etc.

Na Figura C-1 estão apresentadas imagens dos pavimentos ensaiados e no Quadro C-1 estão os níveis sonoros para os diversos ensaios para os dois pavimentos.

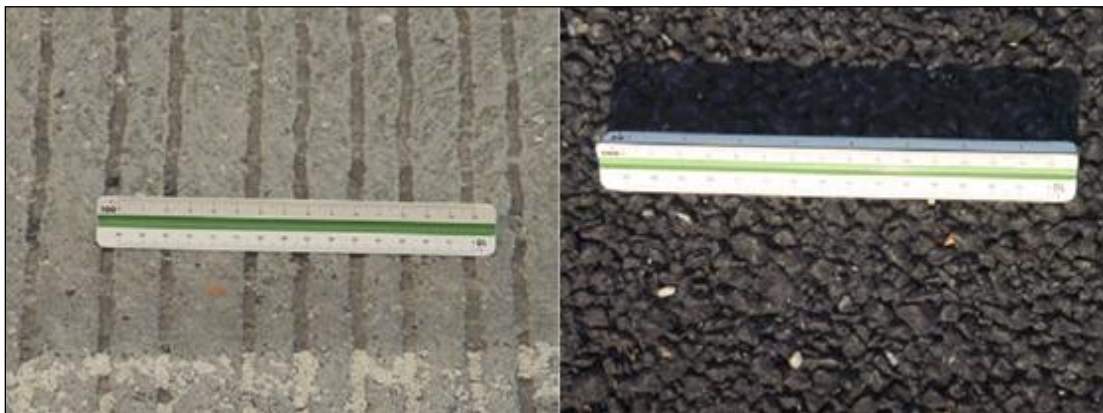


Figura C-1: Pormenor dos pavimentos ensaiados BAC e BMB, nos 4º e 5º Ensaios (Guerra *et al.*, 2005)

Quadro C-1: Níveis sonoros Laeq registados nos ensaios BMB vs BAC (Guerra *et al.*, 2005)

Ensaio	Distância ao eixo da faixa (m)	LAeq, em dB		
		BMB	BAC	Diferença
1	20,0	63,3	74,3	11,0
2	8,5	70,9	80,2	9,3
3	8,5	70,4	80,1	9,7
4	6,5	72,6	80,6	8,0
5	6,5	73,5	82,3	8,8

Os resultados obtidos nos cinco ensaios efectuados apresentam-se bastante coerentes, pelo que são considerados esclarecedores dos objectivos propostos.

Conclui-se de forma clara que existem diferenças médias da ordem de 8 a 11 dB entre os níveis sonoros próprios resultantes da interacção dos pneus com os pavimento ensaiados, o que aponta claramente para o interesse na utilização de camadas de desgaste em BMB como uma medida eficaz para redução do ruído de tráfego em vias rápidas e minimização dos impactes acústicos decorrentes.

▪ Para o ensaio do pavimento BMB versus BB:

Em complemento dos ensaios já descritos, e por forma a avaliar as características acústicas de camadas de desgaste com betume modificado com borracha reciclada de pneus (BMB) relativamente a camadas de desgaste em betão betuminoso tradicional (BB), efectuaram-se medições do ruído de tráfego. Usaram-se os procedimentos e equipamentos utilizados para os ensaios anteriores.

Efectuaram-se dois ensaios no mesmo local.

É importante referir que, o sublanço onde foi realizado este ensaio entrou em exploração em 1995, pelo que o pavimento original em betão betuminoso tradicional (BB), já apresenta alguma degradação superficial.

Na Figura C-2 estão apresentadas imagens dos pavimentos ensaiados e no Quadro C-2 estão os níveis sonoros para os diversos ensaios para os dois pavimentos.



Figura C-2: Pormenor da transição entre os dois tipos de pavimento BMB e BB (Guerra *et al.*, 2005)

Quadro C-2: Níveis sonoros Laeq registados nos ensaios BMB vs BB (Guerra *et al.*, 2005)

Ensaio	Distância ao eixo da faixa (m)	LAeq, em dB		
		BB	BMB	Diferença
1	6,5	79,1	73,5	5,6
2	8,5	78,6	73,5	5,1

Os resultados obtidos permitem concluir que, nas mesmas condições de tráfego (volumes, percentagens de pesados, velocidades de circulação), existem diferenças médias da ordem de 5 a 6 dB entre os níveis sonoros globais gerados em cada revestimento de piso ensaiado, apontando claramente para a vantagem na utilização de camadas de desgaste em BMB como uma medida eficaz para redução do ruído de tráfego em vias rápidas, com minimização dos impactes acústicos provocados.

De acordo com os resultados obtidos, pode-se concluir que o pavimento incorporando betume modificado com borracha de pneus reciclado, apresenta vantagem importantes relativamente ao pavimento rígido em betão armado contínuo e mesmo em relação ao pavimento flexível tradicional, pelo que será mais uma solução a considerar na minimização do ruído originado pelo tráfego rodoviário.

APLICAÇÃO DE MISTURA BETUMINOSA ABERTA COM BETUME MODIFICADO COM ALTA INCORPORAÇÃO DE BORRACHA NA REABILITAÇÃO DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS

## REFERÊNCIAS

AASHTO, 1994. *AASHTO TP8-94: Standard Test Method for Determining the Fatigue Life of Compacted Hot Mix Asphalt (HMA) Subjected to Repeated Flexural Bending*. Washington D.C., Estados Unidos.

AASHTO, 2001. *AASHTO TP7-2001: Standard Test Method for Determining the Permanent Deformation and Fatigue Cracking Characteristics of Hot Mix Asphalt (HMA) Using the Simple Shear Test (SST) Device*. Washington D.C., Estados Unidos.

AI, 1983. *Asphalt Overlays for Highway and Street Rehabilitation*. Asphalt Institute, Manual series n.º 17 (MS-17), Maryland, Estados Unidos.

Andrietta, A., 2002. *Pneus e Meio Ambiente: Um Grande Problema Requer Uma Grande Solução*. Acedido em 11 de Agosto de 2011, em: <http://reciclagemsystem.blogspot.com/>.

Antunes, I.; Giuliani, F.; Sousa, J., 2005. *Caracterização reológica de betumes modificados CRM sujeitos a envelhecimento artificial*. Estrada 2004 - III Congresso Rodoviário Português, Lisboa.

Antunes, M., 1993. *Avaliação da capacidade de carga de pavimentos utilizando ensaios dinâmicos*. Tese de Doutoramento, Laboratório Nacional de Engenharia Civil e Instituto Superior Técnico, Lisboa.

Antunes, M.; Baptista, F.; Eusébio, M.; Costa, M.; Miranda, C., 2000. *Characterization of Asphalt Rubber Mixtures for Pavement Rehabilitation Projects in Portugal*. Asphalt Rubber 2000 - Proceedings. Vilamoura.

Antunes, M.; Eusébio, M.; Costa, M.; Domingos, P.; Lima, H., 2002. *Caracterização da mistura betuminosa com betume modificado com borracha aplicada no ICI*. 2º Congresso Rodoviário Português, Lisboa.

ASTM, 2002. *ASTM D 8: Standard Terminology Relating to Materials for Roads and Pavements*. Vol. 4.03, Road and Paving Materials; Vehicle-Pavement Systems, Annual Book of ASTM Standards 2006, ASTM, West Conshohocken, Pensilvânia, Estados Unidos.

ASTM, 2002. *ASTM D 6114-97: Standard Specification for Asphalt-Rubber Binder*. Vol. 4.03, Road and Paving Materials; Vehicle-Pavement Systems, Annual Book of ASTM Standards 2006, ASTM, West Conshohocken, Pensilvânia, Estados Unidos.

APLICAÇÃO DE MISTURA BETUMINOSA ABERTA COM BETUME MODIFICADO COM ALTA INCORPORAÇÃO DE BORRACHA NA REABILITAÇÃO DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS

Baptista, A., 1999. *Dimensionamento de Pavimentos Rodoviários Flexíveis - Aplicabilidade em Portugal dos métodos existentes*. Dissertação de Mestrado. Universidade de Coimbra. Coimbra.

Baptista, A., 2006. *Misturas Betuminosas Recicladas a Quente em Central: Contribuição para o seu estudo e aplicação*. Tese de Doutoramento, Universidade de Coimbra. Coimbra.

Baptista, A., 2010. *Apontamentos das aulas da disciplina de Pavimentos Rodoviários 2010/2011*. Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu.

Baptista, A.; Picado-Santos, L., 2002. *Estruturas de Pavimento Rodoviário Flexível*.

Batista, F., 2004. *Novas Técnicas de Reabilitação de Pavimentos - Misturas betuminosas densas a frio*. Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, FEUP, Porto.

Branco, F.; Pereira, P.; Santos, L., 2008. *Pavimentos Rodoviários*. Edições Almedina, Coimbra.

Brown, S.; Pell, P.; Stock, A., 1977. *The application of simplified fundamental design procedures for flexible pavements*. Proceedings of the 4th Inter. Conf. on Structural Design of Asphalt Pavements, Universidade do Michigan, vol. 1, Ann-Arbor, Michigan, Estados Unidos.

Caltrans, 1992. *Design Guide for ARHM-GG*. California Department of Transportation. Division of New Technology, Materials and Research. Office of Flexible Pavement Materials, Sacramento, Califórnia, Estados Unidos.

Caltrans, 2006. *Asphalt Rubber Usage Guide*. State of California Department of Transportation. Materials and Testing Services. Office of Flexible Pavement Materials, Sacramento, Califórnia, Estados Unidos.

Cepsa, 2007. *Manual de Pavimentação*. Cepsa Portugal Petróleos, S.A.

Cepsa, 2011. Acedido em 14 de Junho de 2011, em: <http://www.cepsa.com/cepsaPt/>.

Claessen, A.; Edwards, J.; Sommer, P.; Ugé, P., 1977. *Asphalt Pavement Design Manual: The Shell Method*. Proceedings of 4th International Conference on Structural Design of Asphalt Pavements, Universidade do Michigan, Ann Arbor, Michigan, Estados Unidos.

Clemson, 2011. Acedido em 28 de Março de 2011, em: <http://www.ces.clemson.edu/arts>.

Coley, J., 1970. *A Study of Flexible Pavement with RAMFLEX Rubber Additives*. Mississippi St. Highway Department, Mississippi, Estados Unidos.

Comité Europeu de Normalização, 1999. *EN 12591: Bitumen and bituminous binders - Specifications for paving grade bitumens*. Comité Europeu de Normalização, Bruxelas, Bélgica.

Comité Europeu de Normalização, 2003. *EN 12697-22: Bitumen mixtures – Tests methods for hot mix asphalt – Part 22: Wheel tracking*. Comité Europeu de Normalização, Bruxelas, Bélgica.

Comité Europeu de Normalização, 2004. *EN 12697-24: Bitumen mixtures – Tests methods for hot mix asphalt – Part 24: Resistance to fatigue*. Comité Europeu de Normalização, Bruxelas, Bélgica.

Decreto-Lei n.º 111/2001 de 6 de Abril. *Diário da República n.º 82/2001 - I Série A*. Ministério do Ambiente e do Ordenamento do Território. Lisboa.

Decreto-Lei n.º 222/98 de 17 de Julho. *Diário da República n.º 163/98 - I Série A*. Ministério do Equipamento, do Planeamento e da Administração do Território. Lisboa.

Descornet, G., 2000. *Wet Road Influence on Vehicle Noise*. Proceedings of Internoise 2000, Nice, França.

Despacho n.º 4015/2007. *Diário da República n.º 44/2007 - 2.ª Série*. Ministérios do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional e das Obras Públicas, Transportes e Comunicações. Lisboa.

Dias, J.; Picado-Santos, L., 2008. *Characteristics of asphalt binders modified with the incorporation of recycled crumbled rubber*. Acedido em 11 de Janeiro de 2011, em: <http://www.biosafe.pt/noticias/LuisFeiteiraEpam3.pdf>.

Directiva Europeia 1999/31/EC do Conselho de 26 de Abril. *Jornal Oficial das Comunidades Europeias L 182*. Bruxelas, Bélgica.

Domingos, P., 2007. *Reforço de pavimentos rígidos: Modelação do comportamento estrutural*. Instituto Superior Técnico, Lisboa.

Enciclopédia Conhecer, Abril Cultural, volume 2, S. Paulo, Brasil.

APLICAÇÃO DE MISTURA BETUMINOSA ABERTA COM BETUME MODIFICADO COM ALTA INCORPORAÇÃO DE BORRACHA NA REABILITAÇÃO DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS

EP, 2009. *Caderno de Encargos Tipo Obra 14.03 - Pavimentação - Características dos Materiais*. EP, Almada.

EP, 2009. *Caderno de Encargos Tipo Obra 15.03 - Pavimentação - Métodos Construtivos*. EP, Almada.

Fonseca, P.; Barros, R., 2006. *A Utilização do Betume Modificado com Borracha (BMB) em Portugal: A Experiência Adquirida ao Longo de 7 Anos nas Obras em Serviço*. Estrada 2006 - IV Congresso Rodoviário Português, Lisboa.

Fontes, L.; Pereira, P.; Pais, J.; Trichês, G., 2006. *Performance of wet process method alternatives: terminal or continuous blend*. Asphalt Rubber 2006 - Proceedings, Palm Springs, Califórnia, Estados Unidos.

Fontes, L.; Pereira, P.; Trichês, G.; Pais, J., 2008. *A Influência da Origem do Betume no Desempenho de Misturas Betuminosas com Betume Modificado com Borracha*. Estrada 2008 - V Congresso Rodoviário Português, Cascais.

Fontes, L.; Trichês, G.; Pereira, P.; Pais, J., 2007. *Desempenho de Misturas Betuminosas com Betume Modificado com Borracha Através do Processo Húmido*. XIV Congresso Ibero-Americano do Asfalto, Havana, Cuba.

Fontes, L.; Trichês, G.; Pereira, P.; Pais, J., 2008. *Comparação do desempenho de asfaltos produzidos através dos sistemas continuous blend e terminal blend*. 38ª Reunião Anual de Pavimentação/12º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária, Manaus, Brasil.

Fontes, L., 2009. *Optimização do Desempenho de Misturas Betuminosas com Betume Modificado com Borracha para Reabilitação de Pavimentos*. Tese de Doutoramento, Universidade do Minho, Guimarães.

Fontes, L.; Trichês, G.; Pereira, P.; Pais, J., 2009. *Redução da Espessura dos Pavimentos Utilizando Misturas de Asfalto-Borracha*. IV Simpósio Internacional de Avaliação de Pavimentos e Projetos de Reforço, Fortaleza, Brasil.

Freitas, E., 2004. *Contribuição para o Desenvolvimento de Modelos de Comportamento dos Pavimentos Rodoviários Flexíveis – Fendilhamento com Origem na Superfície*. Tese de Doutoramento, Universidade do Minho, Guimarães.

Freitas, E.; Pereira, P.; Picado-Santos, L.; Santos, A., 2006. *A Influência da Água no Ruído Produzido pelo Tráfego Rodoviário*. Universidade do Minho, Guimarães.

Greenbook, 2000. *Standard Specifications for Public Works Construction*. Public Works Standards, Inc., Anaheim, Califórnia, Estados Unidos.

Guerra, C.; Ruivo, F., 2005. *Avaliação do Efeito do Pavimento no Ruído de Tráfego Rodoviário*. Jornadas FEUP 2005, Porto.

Holleran, G.; Reed, J., 2000. *Emulsification of asphalt rubber blends*. Asphalt Rubber 2000 - Proceedings, Vilamoura.

IME, 2011. Acedido em 13 de Setembro de 2011, em:  
[http://transportes.ime.eb.br/MATERIAL%20DE%20PESQUISA/LABOTATORIO/LAB%20LIGANTES/03\\_asphalt\\_arquivos/compquimica.JPG](http://transportes.ime.eb.br/MATERIAL%20DE%20PESQUISA/LABOTATORIO/LAB%20LIGANTES/03_asphalt_arquivos/compquimica.JPG).

InIR, 2010. *Construção e Reabilitação de Pavimentos - Ligantes Betuminosos*. Instituto de Infra-Estruturas Rodoviárias, Lisboa.

International Organization for Standardization, 1997. *ISO 11819-1:1997(E) Acoustics – measurement of the influence of road surfaces on traffic noise – Part 1: statistical pass-by method*. Genebra, Suíça.

JAE, 1995. *Manual de Concepção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional*. JAE, Almada.

Laboratorio del Transporte, 1994. *NLT-173/94: Resistencia a la Deformación Plástica de las Mezclas Betuminosas Mediante la Pista de Ensayo de Laboratorio*.

LNEC, 1997. *E 80 - Betumes e Ligantes Betuminosos: Betumes de pavimentação (classificação, propriedades e exigências de conformidade)*. LNEC, Lisboa.

LNEC, 2006. *Documento de Aplicação 3*. LNEC, Lisboa.

LNEC, 2007. *Homologação de Misturas Betuminosas com Betume Modificado com Borracha*. LNEC, Lisboa.

LNEC, 2008. *Documento de Aplicação 15*. LNEC, Lisboa.

Lombardi, B., 1993. *Du Pétrole Brut Au Bitume: La Langue Marche*. Revue Général des Routes et des Aérodomes, n.º 707.

APLICAÇÃO DE MISTURA BETUMINOSA ABERTA COM BETUME MODIFICADO COM ALTA INCORPORAÇÃO DE BORRACHA NA REABILITAÇÃO DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS

Menezes, M., 2008. *Estudo das Características de Superfície de Pavimentos Rodoviários para Análise da Segurança de Tráfego*. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisboa.

Minhoto, M; Pais, J.; Pereira, P., 2002. *A optimização das misturas betuminosas com betume modificado com borracha reciclada de pneus usados*. 2º Congresso Rodoviário Português, Lisboa.

Mohammad L.; Huang B.; Roberts F.; Rasoulia M., 2000. *Accelerated loading performance and laboratory characterization of crumb rubber asphalt pavements*, Asphalt Rubber 2000 - Proceedings, Vilamoura.

Momm, L.; Saline, R., 2000. *Study of Recycled in Asphalt Concrete Mixtures*. Asphalt Rubber 2000 - Proceedings, Vilamoura.

Mongabay, 2011. *A Brief History of Rubber*. Acedido em 17 de Setembro de 2011, em: <http://rainforests.mongabay.com/10rubber.htm>.

Monismith, C.; Epps, J.; Kasianchuk, A.; McLean, D., 1971. *Asphalt Mixture Behaviour on Repeated Flexure*. Relatório nº. TE 70-5, Universidade da Califórnia, Berkeley, Califórnia, Estados Unidos.

Monismith, C., 1981. *Fatigue Characteristics of Asphalt Paving Mixtures and Their Use in Pavement Design*. 18th Paving Conference - Proceedings, Universidade do Novo México, Albuquerque, Novo México, Estados Unidos.

Morgado, P., 2008. *Concepção e Dimensionamento de Pavimentos em Blocos*. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisboa.

Morilha A.; Greca, M. R., 2003. *Betume Borracha Ecoflex*, Greca Asfaltos, Curitiba, Brasil.

Murtinheira, F., 2011. *Reabilitação estrutural de pavimentos rodoviários: Correção do módulo de deformabilidade das camadas betuminosas*. Dissertação de Mestrado, Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu, Viseu.

Neto, S., 2004. *Avaliação das Propriedades dos Ligantes e das Misturas asfálticas Modificados com Borracha Granulada de Pneus Usados*. Tese de Doutoramento, Faculdade de Tecnologia - Universidade de Brasília, Brasília, Brasil.

- Neto, S.; Farias, M.; Mello, L.; Pereira, P.; Pais, J., 2005. *The use of crumb rubber in asphalt mixtures using the dry process*. 2005 International Symposium on Pavement Recycling, São Paulo, Brasil.
- Neto, S.; Farias, M.; Pais, J.; Pereira, P., 2006. *Dense Graded Hot Mixes using Asphalt-Rubber Binders with High Rubber Contents*. Road Materials and Pavement Design. Volume 7, N.º 1, 2006.
- Neto, S.; Farias, M.; Pais, J.; Pereira, P., 2006. *Influence of crumb rubber gradation on asphalt-rubber properties*. Asphalt Rubber 2006 - Proceedings, Palm Springs, Califórnia, Estados Unidos.
- Notisul, 2010. Acedido em 17 de Outubro de 2010, em:[http://www.notisul.com.br/slir/w1000-h1000/img\\_1\\_01112006033056.jpg](http://www.notisul.com.br/slir/w1000-h1000/img_1_01112006033056.jpg).
- Oliver, J., 2000. *Rutting and Fadigue Properties of Crumb Rubber Hot Mix Asphalts*. Asphalt Rubber 2000 - Proceedings, Vilamoura.
- Pais, J.; Pereira, P., 2007. *The Improvement of Pavement Using Asphalt Rubber Hot Mixes*. 5<sup>th</sup> International Symposium - Highway and Bridge Engineering 2007, Technical Universidade de Iași, Iași, Roménia.
- Pell, P., 1973. *Characterization of Fatigue Behavior. Structural Design of Asphalt Concrete Pavements to Prevent Fatigue Cracking*. Special Report 140, Highway Research Board. Washington, D.C., Estados Unidos.
- Peralta, E., 2009. *Study of the Interaction Between Bitumen and Rubber*. Dissertação de Mestrado, Universidade do Minho, Guimarães.
- Pereira, O., 1971. *Pavimentos Rodoviários*. LNEC, CE 139, vol. III, Lisboa.
- Pereira, P.; Miranda, C., 1999. *Gestão da Conservação dos Pavimentos Rodoviários*. Universidade do Minho, Braga.
- Pereira, P.; Pais, J.; Freitas, E.; Silva, H.; Oliveira, J., 2007. *A reabilitação da rede rodoviária no século XXI: A Contribuição da Inovação para uma Visão Global da Reabilitação Rodoviária*. Universidade do Minho, Guimarães.
- Pestana, C.; Pereira, P.; Pais, J.; Pereira, P., 2006. *Reabilitação de Pavimentos Utilizando Misturas Betuminosas com Betumes Modificados*. Universidade do Minho, Guimarães.

APLICAÇÃO DE MISTURA BETUMINOSA ABERTA COM BETUME MODIFICADO COM ALTA INCORPORAÇÃO DE BORRACHA NA REABILITAÇÃO DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS

Petróleo e Gás, 2011. *Destilação do petróleo*. Acedido em 13 de Setembro de 2011, em: <http://petroleoegasrn.blogspot.com/2011/04/destilacao-do-petroleo.html>.

Probigalp, 2011. Acedido em 14 de Junho de 2011, em: <http://www.probigalp.pt/>.

Recipav, 2007. *A Utilização do Betume Modificado com Borracha Reciclada de Pneus em Portugal*. Recipav, Sines.

Recipav, 2010. Acedido em 23 de Setembro de 2010, em: <http://www.recipav.pt/>.

Salini, R., 2000. *Utilização de Borracha Reciclada de Pneus em Misturas Asfálticas*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil.

Sandberg, U.; Ejsmont, J., 2002. *Tyre/Road Noise Reference Book*. Informex, SE-59040. Kisa, Suécia.

Shatnawi, S.; Holleran, G., 2003. *Asphalt Rubber Maintenance Treatments in California*. Asphalt Rubber 2003 - Proceedings. Brasília, Brasil.

Shatnawi, S.; Long, B., 2000. *Performance of Asphalt Rubber as Thin Overlays*. Asphalt Rubber 2000 - Proceedings. Vilamoura.

Shell, 1991. *The Shell Bitumen Handbook*. Shell Bitumen U.K., Chertsey, Inglaterra.

SHRP, 1994. *SHRP-A-403. Fatigue Response of Asphalt-Aggregate Mixes*. Strategic Highway Research Program. National Research Council. Washington, D.C., Estados Unidos.

Silva, J., 2006. *Characterization of the bituminous mastic and the aggregate-mastic bond: contribution to the study of the bituminous mixtures behaviour*. Tese de Doutoramento, Universidade do Minho, Guimarães.

Silva, J., 2007. *A Incorporação de Borracha de Pneus Inservíveis em Revestimentos Asfálticos de Pavimentos Rodoviários e Urbanos*. Revista Espaço de Sophia N.º 9, mensal, ano I, Brasil.

Sousa, J.; Craus, J.; Monismith, C., 1991. *Summary Report on Permanent Deformation in Asphalt Concrete*. SHRP-A/IR-91-103, Strategic Highway Research Program. National Research Council. Washington, D.C., Estados Unidos.

- Sousa, J.; Solaimanian, M.; Weissman, S., 1994. *Development and Use of the Repeated Shear Test (Constant Height): An Optional Superpave Mix Design Tool*. SHRP-A-698. Strategic Highway Research Program. National Research Council. Washington, D.C., Estados Unidos.
- Sousa, J.; Fonseca, P.; Freire, A.; Pais, J., 1999. *Comparação da Vida à Fadiga e Deformação Permanente entre Misturas com Betume Modificado com Borracha Reciclada de Pneus Convencionais*. Congresso Ibero-Americano do Asfalto, Sevilha, Espanha.
- Specht, L., 2004. *Avaliação de Misturas Asfálticas com Incorporação de Borracha Reciclada de Pneus*. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil.
- Takallou, H.; Takallou M., 2003. *Effects of mixing time and temperature on the visco-elastic properties of asphalt rubber binder*. Asphalt Rubber 2003 - Proceedings, Brasília, Brasil.
- Valorpneu, 2010. Acedido em 11 de Novembro de 2010, em: <http://www.valorpneu.pt/>.
- Vicente, A., 2006. *A Utilização de Betumes Modificados com Borracha na Reabilitação de Pavimentos Flexíveis*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, FEUP, Porto.
- Visser, A.; Verhaeghe, B., 2000. *Bitumen-rubber: Lessons learnt in South Africa*. Asphalt Rubber 2000 - Proceedings. Vilamoura.
- Walubita, L.; Martin, A.; Jung, S.; Glover, C.; Chowdhury, A.; Park, E.; Lytton, R., 2005. *Preliminary Fatigue Analysis of a Common TxDOT Hot Mix Asphalt Concrete Mixture*. Relatório 0-4468-1, Texas Department of Transportation, Austin, Texas, Estados Unidos.
- Wikipedia, 2011. Acedido a 9 de Setembro de 2011, em: <http://en.wikipedia.org/wiki/Asphalt>.
- Zanzotto, L.; Svec, O., 1996. *Utilization of Recycled Tire Rubber in Asphalt Pavement*. Transportation Association of Canada, Otava, Canadá.