

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO
Departamento de Engenharia Civil



**A Utilização de Betumes Modificados com Borracha na
Reabilitação de Pavimentos Flexíveis**

Dissertação de Mestrado em
Vias de Comunicação

Ana Margarida Madeira Vicente

Novembro de 2006

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Departamento de Engenharia Civil

**A Utilização de Betumes Modificados com Borracha na
Reabilitação de Pavimentos Flexíveis**

Ana Margarida Madeira Vicente

**DISSERTAÇÃO APRESENTADA NA FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE
DO PORTO PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE
MESTRE EM VIAS DE COMUNICAÇÃO**

DISSERTAÇÃO REALIZADA SOB A SUPERVISÃO DE
**DOUTORA ENGENHEIRA MARIA DA CONCEIÇÃO MONTEIRO AZEVEDO
PROFESSOR DOUTOR JAIME MANUEL QUEIRÓS RIBEIRO**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Porto, Novembro de 2006

À minha Família

AGRADECIMENTOS

Embora uma dissertação seja, pela sua finalidade académica, um trabalho individual, há contributos de natureza diversa que não podem nem devem deixar de ser realçados. Por esse motivo, gostaria de expressar os meus sinceros agradecimentos.

Gostaria de manifestar o meu agradecimento à Doutora Engenheira Maria da Conceição Monteiro Azevedo, minha orientadora científica, pela supervisão omnipresente, pelo empenho em discutir e analisar resultados, assim como o seu apoio incondicional e sabedoria transmitida ao longo da realização desta dissertação.

Ao Professor Doutor Jaime Queirós Ribeiro, meu co-orientador, pelo acompanhamento científico e por toda a disponibilidade sempre demonstrada.

Um agradecimento especial ao Director de Estradas de Santarém, Engenheiro Alcindo Cordeiro, pelo inexcedível apoio e pelas facilidades concedidas, para que este trabalho se tornasse realidade.

A todos os meus colegas de trabalho da Direcção de Estradas de Santarém, o meu agradecimento, pelo apoio, pela amizade e paciência demonstrada durante a elaboração deste trabalho.

Ao Engenheiro Paulo Fonseca e ao Engenheiro João Pedro Varela, da RECIPAV, pela colaboração e facilidades concedidas, especialmente na disponibilidade de informação que muito contribuiu para a realização desta dissertação.

À Engenheira Susana Maricato, da GALP, ao Engenheiro Hélio Pontes Nunes, da REPSOL, gostaria de agradecer a disponibilidade e a cortesia com que me receberam e disponibilizaram dados, os quais foram fundamentais para a elaboração deste trabalho.

À Engenheira Maria da Luz Rodrigues, da LUSASFAL, pela sua enorme generosidade e incansável ajuda na angariação de elementos fundamentais para a elaboração desta dissertação.

Ao Sr. Juan Flores, da LUSASFAL, o meu agradecimento, pelo apoio, pela disponibilidade demonstrada e pelas excelentes sugestões e informações fornecidas, fundamentais para a realização deste trabalho.

À empresa Construções Pragosa, S.A., especialmente à Engenheira Odília Caetano, pela sua colaboração na realização dos ensaios laboratoriais e pelo enorme auxílio prestado na troca de informações e fornecimento de dados.

À Sr.^a Guilhermina Castro, um especial agradecimento, pela sua simpatia e pelo auxílio prestado ao longo desta dissertação, sobretudo na resolução de questões burocráticas.

Ao Nelson, pela paciência e disponibilidade desde sempre demonstrada para me ajudar, especialmente na fase final desta dissertação.

À tia Mila, ao tio Mário e ao Sérgio, o meu obrigado, pelo constante apoio manifestado, pela disponibilidade e incentivos, imprescindíveis para concluir este trabalho.

Um agradecimento especial à Belita e ao Miguel, pelo caloroso acolhimento, pela amizade e compreensão sempre manifestadas.

Aos meus pais, Alcides e Lisete, à minha irmã Sofia e à minha avó Ana, pelo estímulo e apoio incondicional desde a primeira hora. Pela paciência e grande amizade com que sempre me ouviram e sensatez com que me ajudaram.

Ao meu marido Cláudio, pelas inúmeras trocas de impressões, comentários ao trabalho, pelo inestimável apoio, pela paciência, pela compreensão e permanente insistência na conclusão desta dissertação.

Porto, Novembro de 2006

Ana Margarida Madeira Vicente

RESUMO

As estradas constituem uma infra-estrutura fundamental para o desenvolvimento de qualquer país, dado que facultam e facilitam o deslocamento de pessoas e mercadorias. Essa mobilidade só se realiza eficazmente quando as estradas permitem que os seus utentes circulem com conforto, economia e segurança. Todavia, esses objectivos nem sempre são atingíveis.

As estradas, logo após a sua construção e com o decorrer do tempo, devido ao facto de estarem permanentemente sujeitas à solicitação de vários agentes (tráfego e acções climáticas), ostentam os mais variados tipos de degradações que afectam directamente a condução dos seus utilizadores. Consequentemente, surge a necessidade de recorrer a operações de reabilitação, de modo a dotar os pavimentos com as suas características iniciais e a prolongar-lhes a vida.

Este trabalho apresenta as técnicas de reabilitação mais frequentes, salientando as técnicas de reabilitação recorrendo ao betume modificado com borracha de pneus (BMB). O recurso às técnicas de reabilitação utilizando o BMB em prol das técnicas com betumes convencionais, surge com o intuito de obter misturas betuminosas com melhores características mecânicas, que se reflectem directamente na durabilidade do pavimento, tendo em consideração o progressivo aumento do volume de tráfego e as maiores exigências dos utilizadores.

Recorrendo a técnicas de reabilitação que utilizam betume modificado com resíduos de pneus, contribui-se para que esses tenham um destino mais adequado em termos ecológicos e ambientalmente correctos, com o intuito de se gerar um produto comercializável e útil para a sociedade.

Apesar das diversas vantagens que as técnicas de reabilitação com BMB apresentam, estas têm que ser sempre comparadas com as técnicas de reabilitação convencionais, pois na maioria dos casos, a opção do tipo de soluções depende de um equilíbrio técnico-económico.

Palavras chave

Pavimento

Misturas betuminosas

Betume Modificado com Borracha (BMB)

Técnicas de reabilitação

Reabilitação de pavimentos

Caracterização estrutural

Caracterização funcional

ABSTRACT

Roads constitute a basic infrastructure for the development of any country, allowing and facilitating the rapid displacement of people and merchandise. This displacement is only efficiently performed, when they offer to their users a comfortable, economic and safe travel. However, these requisites are not always satisfied.

After its construction and across its time life, they are exposed to the action of several agents (as traffic and climatic actions), leading them to exhibit a wide range of degradation types, affecting directly its users. Thus, rehabilitation operations are needed, in way to provide its pavements with their original characteristics and increase its time life.

This work presents the most often used pavements rehabilitation techniques, emphasizing that ones based on crumb rubber modified (CRM). The use of CRM techniques instead of conventional techniques using bitumen, aims to obtain asphalt mixtures with better mechanical characteristics, which are directly reflected on the pavement time life, having in consideration the progressive increase of the traffic volume and the users exigencies.

Considering the CRM techniques that include the utilization of modified bitumen with car tires residues, they are contributing to a better destination to car tires, thinking on ecological terms and environmentally corrects, aiming to produce a marketable product and useful for the society.

Despite the various advantages of rehabilitation techniques with CRM, they must always be compared with the conventional ones, since in the majority of cases the adoption of a rehabilitation technique depends on economical and technical factors.

Keywords

Pavement

Asphalt mixtures

Crumb Rubber Modified (CRM)

Rehabilitation techniques

Beneficiation

Conservation

Structural characterization

Functional characterization

LISTA DE SIMBOLOS E SIGLAS

SIMBOLOS

<i>a</i>	Agressividade do eixo da carga p
a.C.	antes de Cristo
ABGE	Agregado Britado de Granulometria Extensa; Tout-venant
AE	Auto-Estrada
BB	Betão Betuminoso
BMB	Betume Modificado com Borracha
BMP	Betume Modificado com Polímeros
CBR	California Bearing Ratio
cm	centímetros
CRM	Crumb Rubber Modified
d_{fn}	Medidas das deflexões
E	Módulo de deformabilidade; Módulo de elasticidade
EA	Equivalente de areia
EN	Estrada Nacional
f	Vida restante
FA	Factor de Agressividade
FWD	Falling Weigh Deflectometer
°C	Grau centígrado
GPR	Ground Penetrating Radar
IP	Índice de Plasticidade
k	Coeficiente
Km	Quilómetro
Kms	Quilómetros
KPa	Quilopascal
LP	Limite de Plasticidade
LL	Limite de Liquidez

LBT	Linha Branca Tracejada
m	metro
mm	milímetro
m²	metros quadrados
MB	Macadame Betuminoso
MBD	Mistura Betuminosa Densa
MBR- BMB	Mistura Betuminosa Rugosa com Betume Modificado com Borracha de pneus reciclados
MPa	Megapascal
N_{ae}	Número admissível de passagens de eixos padrão para a estrutura do pavimento existente
N_{ar}	Número admissível de passagens de eixos padrão para a estrutura do pavimento com reforço
N_{AEP}	Número admissível de eixos padrão
N_f	Vida restante
n_{ij}	Número de eixos elementares
NLT	Normas espanholas
N_p	Número equivalente de passagens de eixos padrão correspondente ao tráfego futuro
NVP	Número de Veículos Pesados no período em análise
P	Carga uniformemente aplicada; pressão; carga; força aplicada; grau de consumo
RS	Revestimento Superficial
SAM	Stress Absorving Membrane
SAMI	Stress Absorving Membrane Interlayer
SP	Semi-Penetração
TMDA	Tráfego Médio Diário Anual
TMDA_p	Tráfego Médio Diário Anual de veículos pesados
ton	tonelada
TV	Tout-Venant
V_a	Percentagem volumétrica de agregado
V_b	Percentagem volumétrica de betume
V_v	Porosidade da mistura

ω	Teor em água
ω_{opt}	Teor em água óptimo
α	Coefficiente
δ	Deformações
δ_d	Baridade seca
ε	Extensão
ε_c	Extensão máxima vertical de compressão admissível no topo da fundação
ε_t	Extensão da extensão de tracção na mistura betuminosa; extensão máxima de tracção admissível
ν	Coefficiente de Poisson
ρ	Densidade específica
σ	Desvio padrão dos valores das deflexões medidas no centro da carga

SIGLAS

AASHTO	American Association of State Highway and Transport Official (EUA)
EP - E.P.E.	Estradas de Portugal - Empresa Pública Empresarial
JAÉ	Junta Autónoma de Estradas
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	vii
RESUMO	xi
ABSTRACT	xiii
LISTA DE SIMBOLOS E SIGLAS	xv
ÍNDICE	xix
LISTA DE FIGURAS	xxv
LISTA DE QUADROS	xxvii
Capítulo 1- Introdução.....	1
1.1 Enquadramento Histórico	1
1.2 Tema da Dissertação	5
1.3 Justificação e Objectivos da Presente Dissertação.....	7
1.4 Descrição do Conteúdo dos Capítulos	8
Capítulo 2 – Pavimentos Rodoviários Flexíveis.....	11
2.1 Introdução	11
2.2 Pavimentos Rodoviários Flexíveis.....	11
2.2.1 Constituição de Pavimentos Flexíveis.....	12
2.3 Gestão da Conservação	15
2.4 Auscultação de Pavimentos	16
2.4.1 Caracterização Superficial de Pavimentos Rodoviários Flexíveis	16
2.4.1.1 Técnicas de Observação Superficial de Pavimentos Rodoviários Flexíveis	18
2.4.2 Caracterização Estrutural de Pavimentos Rodoviários Flexíveis	19
2.4.2.1 Técnicas de Avaliação da Capacidade Estrutural	20
2.5 Degradação de Pavimentos Rodoviários Flexíveis.....	21
2.6 Patologias em Pavimentos Rodoviários Flexíveis	23
2.6.1 Famílias e tipos de patologias em pavimentos flexíveis.....	24
2.7 Dimensionamento e Análise de Reforços de Pavimentos Flexíveis	26
2.7.1 Métodos para Determinação do Modelo de Comportamento Estrutural	27
2.7.2 Metodologia de um Estudo de Reforço de Pavimentos Flexíveis	28

2.7.3 Dimensionamento do Reforço.....	32
2.8 Conclusão	34
Capítulo 3 – Métodos de Reabilitação de Pavimentos Rodoviários.....	35
3.1 Introdução.....	35
3.2 Razões que Justificam um Projecto de Reabilitação de Pavimentos	36
3.3 Metodologia de um Estudo de Reabilitação	36
3.3.1 Recolha de informação disponível	36
3.3.2 Caracterização da situação existente	38
3.3.3 Diagnóstico do estado do pavimento.....	38
3.3.4 Análise de Soluções	39
3.4 Técnicas de Reabilitação	39
3.4.1 Técnicas de Reabilitação das Características Superficiais	39
3.4.1.1 Revestimentos Superficiais Betuminosos.....	40
3.4.1.2 Microaglomerado Betuminoso a Frio.....	45
3.4.1.3 Lama Asfáltica / Slurry Seal	46
3.4.1.4 Argamassa Betuminosa	47
3.4.1.5 Betão Betuminoso	48
3.4.1.6 Microbetão Betuminoso Rugoso/Microbetões	49
3.4.1.7 Betão Betuminoso Drenante.....	50
3.4.1.8 Ranhuragem do Pavimento	50
3.4.1.9 Selagem de Fendas	51
3.4.1.10 Reparações Localizadas	51
3.4.2 Técnicas de Reabilitação das Características Estruturais.....	51
3.4.2.1 Macadame Betuminoso	53
3.4.2.2 Mistura Betuminosa Densa	53
3.4.2.3 Mistura Betuminosa de Alto Módulo.....	53
3.4.2.4 Agregado de Granulometria Extensa Tratado com Emulsão de Betume	54
3.4.2.5 Técnicas Anti-fendas.....	55
3.4.3 Reabilitação de Pavimentos Recorrendo a Técnicas de Reciclagem	57
3.4.3.1 Reciclagem <i>In Situ</i> a Frio	59
3.4.3.2 Reciclagem <i>In Situ</i> a Quente	64
3.4.3.3 Reciclagem a Frio em Central.....	65

3.4.3.4	Reciclagem a Quente em Central	66
3.4.3.5	Reciclagem a Semiquente em Central	68
3.5	Conclusões	69
Capítulo 4	– Modificação do Betume pela Adição de Borracha Reciclada de Pneus Usados	71
4.1	Introdução	71
4.2	O Betume Modificado com Borracha	76
4.2.1	Características da Borracha	77
4.2.2	Propriedades do Betume Modificado com Borracha	79
4.2.3	Mecanismo do Betume Modificado com Borracha	81
4.3	Fabrico do Betume Modificado com Borracha	82
4.4	Tipos de Misturas com BMB e suas Aplicações.....	90
4.4.1	Domínio de Utilização.....	93
4.5	BMB em Portugal	95
4.6	Transporte para a Obra de Misturas com BMB	99
4.7	Colocação em Obra de Misturas com BMB	100
4.8	BMB na Reabilitação e Construção de Pavimentos.....	102
4.8.1	BMB na Reabilitação de Pavimentos	102
4.8.2	BMB na Construção	103
4.9	Vantagens e Desvantagens na Incorporação de Borracha nos Betumes	104
4.9.1	Vantagens na Incorporação de Borracha nos Betumes.....	104
4.9.2	Desvantagens na Incorporação de Borracha nos Betumes	110
4.10	Registo de Desempenhos	111
4.11	Análise Custo-Benefício	113
4.12	Conclusões.....	113
Capítulo 5	– Caso de Estudo.....	117
5.1	Introdução	117
5.2	Descrição da Estrada Estudada	118
5.3	Razões que Justificam o Projecto de Beneficiação da EN 119	119
5.4	Acções Desenvolvidas	119
5.4.1	Recolha de Informação Disponível	120
5.5	Caracterização da Situação Existente.....	122
5.5.1	Caracterização do Traçado em Planta.....	122

5.5.2	Caracterização do Traçado em Perfil Longitudinal.....	122
5.5.3	Caracterização do Perfil Transversal Tipo	122
5.5.4	Caracterização das Ligações, Serventias, Gares e Paragens de Autocarro.....	123
5.5.5	Caracterização do Sistema de Drenagem	124
5.5.6	Caracterização do Equipamento de Segurança.....	125
5.5.7	Serviços Afectados.....	125
5.5.8	Caracterização do Tráfego.....	125
5.5.9	Caracterização do Pavimento Existente	126
5.5.9.1	Observação Visual com Apoio Fotográfico	126
5.5.9.2	Ensaio de Carga com o Deflectómetro de Impacto	130
5.5.9.3	Plano de Prospeção.....	131
5.5.9.4	Ensaio em laboratório	134
5.6	Solução Projectada.....	135
5.6.1	Traçado.....	135
5.6.2	Terraplenagens	138
5.6.3	Drenagem	139
5.6.4	Obras Acessórias.....	141
5.6.5	Equipamento de Segurança	142
5.6.6	Pavimentação	142
5.6.7	Cálculo da Estrutura de Reforço	145
5.6.8	Critérios de dimensionamento.....	147
5.7	Solução Adoptada no Projecto.....	150
5.7.1	Análise da Estrutura do Pavimento	150
5.7.2	Análise de Custos das Soluções Projectadas.....	156
5.8	Conclusões.....	160
Capítulo 6 - Conclusão		161
6.1	Introdução	161
6.2	O Trabalho Desenvolvido.....	163
6.3	Futuros Desenvolvimentos	164

BIBLIOGRAFIA.....	167
ANEXOS	175
ANEXO 1.....	177
ANEXO 2.....	179
ANEXO 3.....	187
ANEXO 4.....	191

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Estrada romana (vista geral).....	2
Figura 1.2 – Estrada romana (vista aproximada).....	2
Figura 1.3 – Estrutura de uma estrada romana	2
Figura 2.1 – Estrutura de um pavimento flexível	14
Figura 2.2 – Parâmetros de um sistema de gestão de pavimentos	16
Figura 2.3 – Fases de avaliação da capacidade de carga de um pavimento.....	28
Figura 2.4 – Metodologia de um estudo de reforço.....	29
Figura 3.1 – Revestimento betuminoso simples (LA).....	41
Figura 3.2 – Revestimento betuminoso simples com dupla aplicação de agregado (LAa)	41
Figura 3.3 – Revestimento betuminoso simples com aplicação prévia de agregado (ALa).....	42
Figura 3.4 – Revestimento betuminoso duplo (LALa).....	42
Figura 3.5 – Revestimento betuminoso duplo com aplicação prévia de agregado (ALALa)....	42
Figura 3.6 – Revestimento triplo (LALALa).....	43
Figura 3.7 – Exemplos de grelhas	56
Figura 3.8 – Ciclo fechado de construção	58
Figura 3.9 – Tipos de reciclagem	59
Figura 3.10 – Reciclagem a quente em central.....	67
Figura 4.1 – Resíduos de pneus	73
Figura 4.2 – Desastre ecológico – incêndio de pneus.....	74
Figura 4.3 – Alternativas para reutilização de pneus.....	74
Figura 4.4 – Partículas de borracha com dimensões entre os 0 e os 4 mm.....	78
Figura 4.5 – Partículas de borracha com dimensões entre os 15 e os 20 mm.....	78
Figura 4.6 – Túnel criogénico.....	83
Figura 4.7 – Fases de reacção do betume-borracha.....	84
Figura 4.8 – Esquema do fabrico de BMB, por via húmida – produção em obra	85
Figura 4.9 – Fabrico de BMB, por via húmida – produção em fábrica	88
Figura 4.10 – Via seca	89

Figura 4.11 – Exemplo de aplicação – SAMI.....	95
Figura 4.12 – Depósitos de fabrico de BMB na LUSASFAL	97
Figura 4.13 – Temperaturas a serem aplicadas na elaboração e aplicação do BMB	100
Figura 5.1 – Localização da E.N. 119 na rede viária envolvente	118
Figura 5.2 – Envelhecimento do betume	127
Figura 5.3 – Distinção entre a colocação de diferentes camadas de desgaste.....	128
Figura 5.4 – Pele de crocodilo/ninhos.....	128
Figura 5.5 – Abatimentos e pele de crocodilo	129
Figura 5.7 – Pendente transversal de uma estrada	153

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 – Influência das principais características superficiais dos pavimentos nas exigências dos mesmos.....	17
Quadro 2.2 – Técnicas de avaliação da capacidade estrutural.....	21
Quadro 2.3 – Agentes/Causas de degradação.....	22
Quadro 2.4 – Evolução e efeito das degradações estruturais.....	22
Quadro 2.5 – Manifestações dos vários tipos de degradações.....	24
Quadro 2.6 – Factores de agressividade	31
Quadro 3.1 – Trabalhos de reabilitação preparatórios.....	52
Quadro 4.1 – Acumulação anual de pneus usados nos países da União Europeia	73
Quadro 4.2 – Características das misturas betuminosas segundo a tecnologia de incorporação de borracha	91
Quadro 4.3 – Características das misturas betuminosas segundo a tecnologia de incorporação de borracha	95
Quadro 5.1 – Valores de tráfego na E.N. 119.....	126
Quadro 5.2 – Valores de tráfego na E.N. 119.....	131
Quadro 5.3 – Locais onde se efectuaram as sondagens à rotação	132
Quadro 5.4 – Espessura e natureza das camadas identificadas nas carotes recolhidas na E.N. 119	132
Quadro 5.5 – Locais onde se efectuaram poços de sondagem.....	133
Quadro 5.6 – Espessura e natureza das camadas identificadas nos poços	134
Quadro 5.7 – Principais características dos solos de fundação.....	135
Quadro 5.8 – Previsão do TMDA p	146
Quadro 5.9 – Estrutura do pavimento.....	148
Quadro 5.10 – Deflexões.....	148
Quadro 5.11 – Estrutura do pavimento.....	148
Quadro 5.12 – Deflexões.....	149
Quadro 5.13 – Estrutura do pavimento.....	149
Quadro 5.14 – Deflexões.....	149

Quadro 5.15 – Resultados do cálculo da capacidade de carga dos modelos estruturais adoptados	150
Quadro 5.16 – Solução 1- secção corrente.....	151
Quadro 5.17 – Solução 1- secção entre o km 46+000 e km 47+000	151
Quadro 5.18 – Solução 2 - secção corrente.....	152
Quadro 5.19 – Solução 2- secção entre o km 46+000 e km 47+000	152
Quadro 5.20 – Solução 1e 2 - tratamento de raízes e alargamentos	152
Quadro 5.21 – Solução 3 - secção corrente.....	154
Quadro 5.22 – Solução 3 - secção entre o km 46+000 e km 47+000	154
Quadro 5.23 – Solução 4 - secção corrente.....	155
Quadro 5.24 – Solução 4 - secção entre o km 46+000 e km 47+000	155
Quadro 5.25 – Soluções 1, 2, 3 e 4 - tratamento de raízes e alargamentos.....	156
Quadro 5.26 – Solução 1 - valor total	156
Quadro 5.27 – Solução 2 - valor total	157
Quadro 5.28 – Solução 3 - valor total	158
Quadro 5.29 – Solução 4 - valor total	159

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento Histórico

O anseio pelas viagens, o desejo de conhecer outros povos e estabelecer relações com outras civilizações foi sempre uma constante na história do homem. Por diversas razões, religiosas, comerciais, políticas, de subsistência, de expansão territorial ou por simples curiosidade, a história do homem está profundamente ligada às deslocamentos e às viagens [Barradas, 2004]. Por todos esses motivos, as estradas devem ser consideradas como uma consequência da civilização.

Desde os tempos mais remotos que existem estradas, pensa-se que a mais antiga estrada do mundo foi construída no Egito, ao passo que a mais antiga da Europa foi construída na ilha de Creta por volta do ano 2000 a.C., no entanto, foram os romanos que as construíram com o conceito que existe actualmente (Figura 1.1 e Figura 1.2).

Uma das primeiras e presumivelmente uma das maiores estradas romanas a surgir foi a *Via Appia*, que fazia ligação entre Roma e Brundisium, no norte de Itália. A sua construção iniciou-se no ano 312 a.C. e terminou no ano 244 a.C. e desenvolveu-se ao longo de 660 quilómetros.

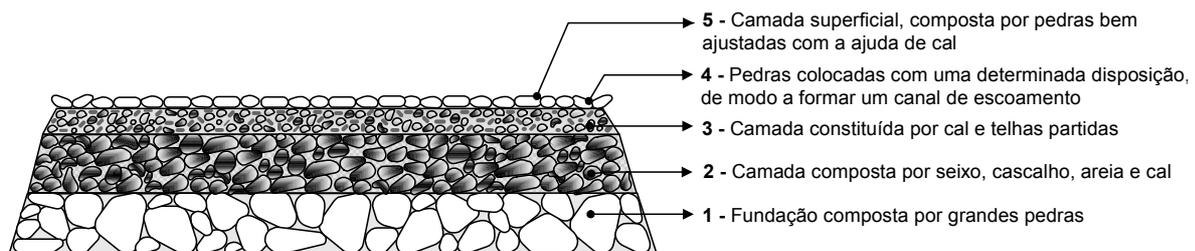
As estradas romanas atravessaram a Europa Ocidental e do Sul, Ásia Menor, Egito e África, formando uma malha muito vasta, com cerca de 372 estradas, com um total aproximado de 78 000 quilómetros, tendo como objectivo principal a movimentação do exército romano. Contudo, rapidamente também foram utilizadas com o intuito comercial e de lazer [Wikipedia, 2005]. Pode-se afirmar que as estradas romanas depressa se transformaram num verdadeiro sinal de uma civilização avançada.

O traçado adoptado era muito linear, oferecendo ao exército romano, rotas mais curtas com a vantagem de permitir uma melhor visualização dos inimigos [Wikipedia, 2005]. As estradas eram pavimentadas em pedra de forma a resistirem às adversas condições atmosféricas e a suportarem o tráfego existente na época, permitindo que as viagens se realizassem com um maior conforto. A qualidade de construção aliada a uma estrutura inovadora, permitiram que muitas dessas estradas existam ainda nos nossos dias.

Figura 1.1 – Estrada romana (vista geral)¹Figura 1.2 – Estrada romana (vista aproximada)²

A construção das estradas romanas consistia na elaboração de uma estrutura de quatro camadas (Figura 1.3). Os exércitos romanos limpavam o terreno, na zona de passagem da estrada, retirando árvores e pedras. De seguida, abriam uma trincheira para que depois se pudesse proceder ao seu preenchimento. O fundo da trincheira era coberto com grandes pedras, de seguida era colocada uma camada composta por pedras mais pequenas, seixos, cascalho, areia e cal para proporcionar uma base firme. A terceira camada consistia na colocação de uma mistura contendo cal com telhas partidas. Sobre esta colocavam-se por fim as pedras, bem ajustadas, ligadas com uma mistura que tinha incorporada a cal, para que a superfície da estrada ficasse o mais regular possível [Teachingideas, 2005].

O curioso é que nesta época já existia o conceito de valeta de bordadura, pois as estradas apresentavam de ambos os lados, pedras colocadas com dada uma disposição (Figura 1.3) que permitia o escoamento das águas, tudo para que a superfície da estrada ficasse seca.

Figura 1.3 – Estrutura de uma estrada romana³

As estradas romanas, com todas as camadas referidas anteriormente, atingiam espessuras na ordem dos 90 centímetros, portanto julga-se que a construção atingia preços exorbitantes [Teachingideas, 2005]. Com a queda do império romano, a economia global desceu e assim as estradas perderam a sua importância [Oda, 2003].

¹ Fonte: [Wikipedia, 2005]

² Fonte: [Wikipedia, 2005]

³ Adaptado de [Teachingideas, 2005]

Isso foi notório durante a Idade Média, pois não existiu a preocupação de substituir ou manter as estradas romanas, o que levou à sua progressiva deterioração.

Foi então na segunda metade do século XVIII, que começam um período de construção de uma nova rede rodoviária na Europa, onde se incrementou a rigidez das superfícies, criando condições de tráfego a veículos mais pesados.

Portugal, não foi exceção, também na mesma época, existiu uma preocupação com a conservação das estradas, onde se manifestava o interesse pelo tipo de rodados e o número máximo de animais de tracção em veículos de duas rodas, para que os veículos da época não transportassem carga excessiva [Neto, 1985].

No início, as técnicas de construção foram copiadas dos Romanos, porém, com a escassez de materiais e de mão-de-obra, a quantidade de rocha utilizada foi gradualmente reduzida e, através de pesquisas, foram desenvolvidas novas técnicas de construção. Dois métodos importantes, recorrendo a pavimentos com camadas com materiais pétreos, foram nessa época desenvolvidos, recebendo o nome dos seus inventores.

O sistema inventado por Tresaguet, consistia em escavar uma trincheira no terreno natural, com declives transversais e preenchê-la com três camadas de materiais pétreos de dimensões decrescentes, da fundação para a superfície, sendo a fundação do pavimento (elemento resistente essencial) constituída por blocos armados à mão (*fondation en hérisson*).

Quanto ao sistema inventado por Scot McAdam, consistia na execução de camadas sucessivas de pedras britadas de menores dimensões. Esse método de construção teve muito êxito, continuando ainda hoje a ser utilizado para as camadas de sub-base e base, os ABGE (agregados britados de granulometria extensa) [Jacinto, 2003]. Estes dois métodos, durante o século XIX, garantiram estradas de razoável qualidade, para veículos de tracção animal, porém mostraram-se inadequados quando surgiu o automóvel. Devido às velocidades de circulação dos mesmos, surge a poeira e a projecção de pedras soltas, levando a que as estradas de degradassem rapidamente [Jacinto, 2003]. Era necessário recorrer a uma solução que permitissem uma conservação mais duradoura dos pavimentos, que apresentasse uma maior capacidade de cargas, que reduzisse a infiltração de águas que protegesse os pedões da projecção de pedras.

Foi então que nesse mesmo século surgiu o alcatrão e o betume asfáltico, permitindo a realização de camadas aglutinadas e impermeáveis, dando a esses pavimentos a estrutura dos pavimentos flexíveis actuais.

Enquanto o tráfego de automóveis era reduzido, as estradas funcionaram tanto para veículos motorizados como para veículos de tracção animal. No período anterior à Primeira Guerra Mundial, com o aumento do número de automóveis, acabou por se verificar que os veículos de tracção animal não poderiam conviver na mesma estrada que os veículos motorizados. Foi durante a Primeira Guerra Mundial, surgem as centrais descontínuas de betão betuminoso, o que levou a uma lenta substituição dos revestimentos com ligantes hidrocarbonatados por camadas de desgaste em betão betuminoso [Oda, 2003].

Assim, com o passar do tempo as características dos traçados tiveram que ser adaptadas aos automóveis, como o aumento dos raios das curvas horizontais e a eliminação de variações bruscas da directriz.

No que respeita aos pavimentos flexíveis, as primeiras abordagens ao dimensionamento, foram por via empírica, com ensaios à escala natural e a criação do método de CBR, por O. J. Porter, que veio a ter alguns aperfeiçoamentos com a experiência colhida na Segunda Guerra Mundial [Jacinto, 2003].

A Segunda Guerra Mundial trouxe um novo alento às estradas devido à necessidade de aumentar a sua capacidade de carga, uma vez que nessa época estavam sujeitas a solicitações mais rígidas, exigindo novas tecnologias apoiadas no asfalto.

O desenvolvimento da aviação, contribuiu bastante para o desenvolvimento tecnológico das estradas, uma vez que era necessário efectuar estudos, das pistas dos aeródromos para que esses resistissem a cargas mais imponentes que as das estradas rodoviárias. Assim, Burmister, nesta época, apresentou a sua teoria de cálculo das tensões e deformações em sistemas de camadas e a sua aplicação ao dimensionamento de aeródromos.

Hveem (1948) desenvolveu entretanto um método que permitiu atender melhor às características dos materiais das diferentes camadas. Em paralelo, diversos investigadores começam a fazer abordagens teóricas do problema do dimensionamento, com apoio na teoria da Elasticidade, procurando calcular o estado de tensão e deformação em sistemas de camadas elásticas sobre fundação elástica.

No século XX, começa-se a generalizar-se o emprego do cimento como aglutinante, dando origem a um novo conjunto de soluções de pavimentação. Na segunda metade do século XX, foram os Estados Unidos, que impulsionaram a construção de estradas, desenvolvendo métodos de dimensionamento e de construção.

Os Estados Unidos prosseguem as investigações por via experimental com os ensaios WASHO (1955) e AASHO (1958-60). Esses foram marcantes pelas conclusões alcançadas que deram origem a diversos métodos de dimensionamento: Shook e Finn (1962), USCE (1962), Asphalt Institute (1964), LPC (1965), Road Note 29 (1970).

Quanto aos pavimentos rígidos, as primeiras contribuições para a análise estrutural das lajes devem-se a Older (1924) e Goldback (1925). Os seus trabalhos foram desenvolvidos por Wastergaard (lajes com apoio de Winkler) e por Hogg e Hall (lajes sobre sólido elástico) que deduziram fórmulas para o cálculo das tensões e assentamentos provocados por uma roda em certas posições. Em 1950, Pickett e Ray, permitiram generalizar o cálculo a qualquer combinação de cargas. Desde então numerosos progressos foram feitos, dispondo-se hoje de métodos evoluídos, dos quais o da *Portland Cement Association* é dos de mais larga aplicação.

Desde a segunda metade do século XX, que se tem tentado aprofundar os conhecimentos sobre o comportamento real dos materiais de pavimentação (alguns deles reconhecidamente não elásticos) mediante o desenvolvimento de modelos apoiados em ensaios de laboratório e ensaios de campo e consideração desses modelos nos algoritmos de cálculo, agora disponíveis graças a desenvolvimentos informáticos entretanto ocorridos [Jacinto, 2003].

Actualmente, não são apenas as novas tecnologias de construção de estradas novas que preocupam e que necessitam de ser desenvolvidas. As estradas já construídas necessitam de ser beneficiadas e/ou reforçadas. Tendo em conta esse problema, dependendo dos níveis de degradação, têm-se desenvolvido diversos métodos de reforço de pavimentos. Métodos esses, que se baseiam em primeiro lugar numa rectroanálise, para determinação da resistência do pavimento actual com recurso a vários

tipos de ensaios e análises para que posteriormente se proceda à determinação das espessuras de camadas ou técnicas de reforço para aumentar a vida útil dos pavimentos em análise [Jacinto, 2003].

As progressivamente crescentes solicitações do tráfego e as maiores exigências dos utilizadores das estradas têm, nos tempos mais recentes, provocado o aparecimento de novas concepções de pavimentação, emprego de novos materiais e implementação de novas técnicas de reabilitação que integram as mais variadas soluções actualmente ao dispor da engenharia rodoviária.

1.2 Tema da Dissertação

Os materiais betuminosos têm sido usados como revestimentos nos pavimentos flexíveis há mais de 100 anos, entretanto há duas décadas, as estruturas dessas estradas feitas com betume convencional têm-se deteriorado mais rapidamente do que era esperado devido ao aumento de tráfego, das cargas por eixo e da pressão dos pneus e ainda devido a uma manutenção ineficiente.

As degradações existentes nos pavimentos têm principalmente a forma de severas deformações permanentes, fissuras, perda de textura, perda de aderência, perda de regularidade, perda de características reflectoras, perda de materiais da superfície de desgaste e até mesmo perda de características associadas à diminuição de ruído. Essas patologias existentes fazem com que as estradas não ofereçam condições de segurança, conforto e economia aos utentes, sendo necessário recorrer à sua reabilitação para repor a qualidade inicial.

Assim, as Administrações Públicas, actualmente, deparam-se com o grande objectivo de conservar e reabilitar o património construído, limitando-se aos orçamentos disponíveis, bem como o de prosseguir com a modernização da rede, de acordo com os novos níveis de tráfego e com as crescentes exigências de qualidade.

Por outro lado é crucial que a conservação e reabilitação de pavimentos atenda às questões ambientais, favorecendo a economia de matérias-primas a utilizar na construção rodoviária e o aproveitamento de materiais alternativos, como a borracha de pneus inutilizados. A percepção de que os recursos da natureza são escassos e devem ser preservados para as gerações futuras e, de uma certa forma, de que o desenvolvimento só será sustentável se promover o equilíbrio entre as necessidades económicas e sociais das populações e a protecção do meio ambiente, sendo relativamente recente, tem levado a que os impactos ambientais tenham peso crescente também nas decisões relacionadas com a construção e conservação de estradas.

Por outro lado, as crescentes preocupações ambientais têm levado a um incentivo, por parte de diversos organismos internacionais, no sentido de adopção de técnicas que possibilitem a economia de matérias-primas e a reutilização ou reciclagem dos materiais já existentes nas estradas a reabilitar [OCDE, 1997].

Para a concretização destes objectivos, não é possível continuar a aplicar exclusivamente as técnicas tradicionais na conservação e reabilitação de pavimentos. O orçamento limitado disponibilizado para estas actividades, a necessidade de diminuir os impactos ambientais e também os custos suportados pelos utentes, motivados pelo mau estado dos pavimentos, ou pelo fecho frequente de via para obras, justificam plenamente o estudo de novas soluções, nomeadamente daquelas que têm vindo a ser implantadas no nosso país, a título experimental [Batista, 2004].

Os pavimentos rodoviários são projectados para um dado período de vida, durante o qual deverão ser alvo de medidas de conservação e findo o qual se procederá à sua reabilitação de acordo com as condições e critérios da altura. Este facto obriga ainda a que, actualmente, aquando da tomada de decisão da sua construção e/ou reabilitação, sejam utilizadas técnicas e materiais economicamente viáveis.

A conjugação dos factores sócio-económicos e ambientais tem conduzido ao aparecimento e desenvolvimento de novas técnicas e materiais de conservação e reabilitação de pavimentos rodoviários que tendem a responder aos actuais níveis de exigência.

As novas técnicas de reabilitação/conservação devem proporcionar uma relação custo-benefício das intervenções mais favorável, e uma diminuição dos custos ambientais e dos custos dos utentes, sem prejuízo do seu desempenho face às características que se pretendem reabilitar e conservar.

A utilização de materiais alternativos e utilização de novas técnicas para a conservação e reabilitação e até mesmo para a construção de pavimentos são, no entanto, levantadas algumas objecções, dado que os referidos materiais nem sempre obedecem às especificações de uso corrente, não sendo também conhecido o desempenho, a médio e longo prazo, das novas soluções de pavimentação. Tal desempenho depende, não só dos materiais e técnicas construtivas adoptadas, mas também de outros aspectos, tais como o estado do pavimento, a sua constituição, o tráfego utente, condições climáticas, etc..

É neste contexto que se insere o presente trabalho, no qual são abordadas diferentes técnicas de reabilitação de pavimentos de utilização recente em Portugal. Torna-se fundamental obter um conhecimento de cada técnica de reabilitação/conservação, considerando as suas potencialidades quanto às propriedades mecânicas, resistência às mais diversas acções, nomeadamente às solicitações crescentes de tráfego.

Sendo diversas as técnicas tradicionais e não tradicionais de reabilitação que têm vindo a ser utilizadas no nosso país, houve a necessidade de focalizar os estudos de reabilitação/conservação recorrendo a betumes modificados com borracha, devido a estes estarem dotados de características peculiares que permitem fazer face a diversos tipos de patologias de uma forma eficaz.

Os betumes modificados por borracha são os betumes obtidos por incorporação de borracha de pneus reciclados no betume, modificando-o e atribuindo-lhe propriedades reológicas não obtidas com o betume convencional. A adição da borracha atribui à mistura, uma grande flexibilidade, com capacidade de absorver a reflexão de fendas, uma maior resistência à acção do tráfego, menos susceptível a variações climáticas e com maior durabilidade.

As propriedades do BMB dependem de vários factores, como o tipo de borracha, o teor de borracha, o tipo de ligante e o tipo de fabrico. Dependendo desses factores, obtêm-se misturas betuminosas, com características diferentes e consequentemente com aplicações diferentes.

De referir, que o betume modificado de borracha reciclada de pneus pode ser utilizado na maior parte das técnicas de reabilitação/conservação de estradas.

Paralelamente, surge a questão ambiental ligada ao aproveitamento do resíduo pneu e, não menos importante, o facto de pelas qualidades físicas do produto se poder reduzir as espessuras dos pavimentos, o que directamente faz com que se utilizem menos materiais granulares (agregados),

menos transporte e menos energia no processo de fabrico das misturas betuminosas com este tipo de betume [Fonseca, 2004].

Um dos usos mais nobres para os resíduos provenientes da borracha de pneus inutilizados é a sua incorporação no betume, uma vez que a sua disposição em aterros sanitários é uma problemática, pois os pneus dificultam a compactação. Todavia, quando os pneus são abandonados em locais inadequados representam um risco ambiental muito elevado, pois representam risco constante de incêndio, que contamina o ar com um fumo altamente tóxico e deixa um óleo que se infiltra e contamina o lençol freático.

Na procura exaustiva de utilizar materiais recicláveis, o campo da construção e da reabilitação de estradas tem sido uma área em franco desenvolvimento [Fonseca, 2004].

A utilização de betume modificado com borracha na reabilitação de pavimentos é uma das recentes técnicas de reabilitação de pavimentos rodoviários em Portugal.

As empresas CEPSA, GALP, LUSASFAL, RECIPAV e REPSOL produzem o betume modificado com borracha reciclada no nosso país. Todas elas apresentam produtos com características diferentes, que podem ser aplicados em casos diferentes, chegando mesmo a diferenciarem-se no modo de fabrico de obtenção do BMB.

Segundo estas, a aplicação desse tipo de betume tem tido uma afluência maior nos últimos tempos, especialmente na reabilitação de pavimentos.

Tem existido acompanhamento de várias entidades nacionais no fabrico e aplicação de misturas com BMB, com o intuito de contribuir para o estabelecimento de especificações relativas a esse tipo de misturas betuminosas devidamente adaptadas às condições portuguesas.

Apesar das diversas vantagens que as técnicas de reabilitação com BMB apresentam, essas têm que ser sempre comparadas com as técnicas de reabilitação convencionais, pois na maioria dos casos, a solução depende de um equilíbrio técnico-económico.

1.3 Justificação e Objectivos da Presente Dissertação

Presentemente em Portugal, encontram-se muitos quilómetros de estrada em elevado estado de degradação. Assim, torna-se importante beneficiá-los, de modo a prolongar a sua vida útil, recorrendo a métodos de reabilitação adequados. Logo, face à crescente necessidade de reforçar os pavimentos, considera-se justificado e oportuno o desenvolvimento desta dissertação.

Ressalta assim, a importância de, aquando da decisão de reabilitar um pavimento, se conhecerem as técnicas convencionais e inovadoras passíveis de serem utilizadas em cada caso, bem como as respectivas vantagens e desvantagens, por forma a otimizar-se a escolha da solução a implementar.

Neste sentido, o objectivo geral deste trabalho é o de contribuir para um melhor conhecimento de técnicas tradicionais e não tradicionais de conservação e reabilitação de pavimentos flexíveis e respectiva eficácia; conhecimento dos materiais e processos construtivos utilizados e o comportamento dos pavimentos onde tais técnicas são aplicadas.

Na maioria das técnicas de conservação e reabilitação de pavimentos flexíveis é possível utilizar o BMB.

O BMB confere às misturas betuminosas maior flexibilidade e elasticidade, melhor comportamento na resistência à fadiga, melhor comportamento relativamente às deformações plásticas, diminuição da susceptibilidade térmica, aumento da coesão interna, aumento da resistência ao envelhecimento. Propriedades estas que permitem que os pavimentos não necessitem de uma manutenção tão exaustiva e apresentem uma durabilidade maior.

Este trabalho tem como principal objectivo contribuir para consolidar conhecimentos relativos às misturas betuminosas com BMB, sobretudo na avaliação dos campos de aplicação, onde é necessário um conhecimento das vantagens e desvantagens dos betumes modificados com borracha na reabilitação de pavimentos rodoviários.

Do exposto anteriormente, ressalta a importância de utilizar o BMB nas técnicas de beneficiação/conservação e até em construção nova, beneficiando o interesse ambiental e económico, no sentido em que colaboram para o decrescente número de resíduos de pneus, diminuindo assim os acidentes ecológicos e o recurso a matérias-primas naturais.

A fim de não restringir o âmbito da presente dissertação, existiu a necessidade de realizar um *state of art*, descrevendo sucintamente as características e patologias dos pavimentos de modo a enquadrar o tema deste trabalho. Essa descrição é realizada sumariamente em virtude de ter sido objecto de estudo de diversas dissertações na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

1.4 Descrição do Conteúdo dos Capítulos

Com o intuito de atingir os objectivos referidos anteriormente, esta dissertação foi estruturada em 6 capítulos.

No presente capítulo, é abordada, de uma forma resumida, a evolução dos pavimentos rodoviários desde os tempos mais remotos até aos tempos mais actuais. Está também patente neste capítulo uma contextualização do tema da dissertação, assim como os objectivos propostos.

No Capítulo 2, encontra-se descrita a caracterização de pavimentos rodoviários flexíveis. Essa caracterização assenta essencialmente na definição de pavimentos rodoviários, na descrição das várias camadas que o constituem e no modo de funcionamento, como nota introdutória à compreensão das degradações que neles podem surgir.

São apresentadas as características superficiais e estruturais, em termos de afectação da comodidade e segurança dos utentes e em relação à sua influência no meio ambiente e na economia de circulação e exploração. Nessa perspectiva são enumeradas várias técnicas, equipamento e métodos de avaliação das características superficiais e estruturais, com o objectivo de avaliar a necessidade de reabilitação ou de reforço de uma dada estrada.

É realizada uma breve abordagem aos métodos de dimensionamento de reforço e de retroanálise de pavimentos rodoviários flexíveis.

Foram ainda referidos vários mecanismos de degradação das características superficiais e estruturais dos pavimentos, tentando explicitar as suas origens e evoluções. Nesse seguimento, foi ainda realizada uma abordagem acerca da gestão e conservação dos pavimentos.

No Capítulo 3, abordam-se aspectos relativos à conservação e reabilitação de pavimentos, sendo expostos alguns conceitos e referidos diferentes tipos de técnicas de conservação e reabilitação de pavimentos rodoviários flexíveis, enunciando as suas vantagens, desvantagens e principais tipos de aplicação possíveis.

No Capítulo 4, aborda-se a utilização do betume modificado com borracha em misturas betuminosas como solução para fazer face a diversos tipos de patologias, usualmente visíveis em pavimentos rodoviários. Este capítulo inicia-se com um enquadramento histórico, de seguida tentou-se dar uma visão de várias características do betume modificado com borracha.

São apresentados os vários processos de fabrico, transporte e aplicação do betume modificado com borracha, assim como os tipos de produtos finais que se podem obter e as situações em que podem ser aplicados.

Enumeram-se e descrevem-se vários ensaios que se efectuam aos betumes modificados com borracha com o objectivo de comprovar certas propriedades e características para esse tipo de betume.

Por fim, neste capítulo são ainda enunciadas as vantagens e desvantagens na utilização desta técnica, referindo alguns registos de desempenhos em vários países.

O Capítulo 5, surge na sequência, como aplicação dos assuntos abordados nos capítulos anteriores. Neste contexto, é apresentado um estudo realizado aquando da elaboração do projecto da Estrada Nacional 119 (E.N. 119), onde se tenta definir o método de reabilitação mais adequado.

Foram realizados dois estudos, um que se baseava na reabilitação do pavimento da E.N. 119 recorrendo aos métodos tradicionais e o outro que recorria à reabilitação com aplicação de betumes modificados com borracha de pneus. Nesse seguimento foram realizados estudos comparativos, em que se seguiu uma análise das vantagens e desvantagens na aplicação de cada uma das soluções.

No Capítulo 6, apresenta-se uma síntese das principais conclusões decorrentes da realização deste trabalho, apontando algumas direcções possíveis para futuros desenvolvimentos que se enquadrem neste tema.

Capítulo 2

PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS FLEXÍVEIS

2.1 Introdução

As estradas constituem uma infra-estrutura fundamental para o desenvolvimento de qualquer país, na medida em que permitem a deslocação de pessoas e mercadorias. Esse deslocamento só se realiza eficazmente, quando as estradas possibilitam que os seus utentes circulem com conforto, economia e segurança. As estradas, após a construção, podem ou não oferecer todas essas condições, porém essas qualidades, devido aos mais variados factores, com o tempo vão diminuindo, existindo a necessidade de preservá-las. Assim, a gestão da conservação torna-se fundamental, pois apoia-se numa análise sistemática de informação relativa à rede de estradas construídas e à evolução do estado ou qualidade ao longo do tempo. A análise do pavimento baseia-se sobretudo na avaliação das características superficiais e estruturais, que pode ser realizada através de vários métodos e equipamentos. A informação obtida com a análise do pavimento serve de base aos serviços de gestão, manutenção e reforço de pavimentos. As características estruturais e superficiais, quando afectadas, caso não sofram intervenções, evoluem até atingirem a ruína dos pavimentos.

Para que se compreenda os processos de degradação e de reabilitação de pavimentos rodoviários flexíveis é necessário ter a noção de pavimento flexível e como este funciona.

2.2 Pavimentos Rodoviários Flexíveis

Designa-se por pavimento rodoviário, uma estrutura composta pela sobreposição de camadas de espessura finita, apoiadas em fundação de terreno natural, devidamente regularizado, ou em obras de arte, que é projectada para suportar vários tipos de tráfego e acções, ao longo do seu período de vida.

O pavimento rodoviário baseia-se numa estrutura que assenta nos seguintes requisitos:

1. Resistir e distribuir à fundação as tensões verticais geradas pela acção do tráfego;
2. Melhorar as condições de circulação no que se refere à comodidade e segurança dos seus utilizadores;
3. Resistir aos esforços horizontais que nele actuam, no sentido de proporcionar maior durabilidade à camada de desgaste.

Assim, o pavimento tem como objectivo tornar possível o trânsito de veículos, de uma forma segura e confortável, através de uma estrutura durável e económica, quando sujeito aos mais variados agentes atmosféricos.

Na generalidade, os pavimentos dividem-se em três classes distintas: pavimentos flexíveis, semi-rígidos e rígidos. Essas classes dependem da deformabilidade das camadas e dos materiais utilizados na sua construção. Esta dissertação apenas abordará os pavimentos rodoviários flexíveis, uma vez que estes representam mais de 90% da extensão da rede rodoviária nacional.

Os pavimentos rodoviários são projectados para um dado período de vida útil, geralmente de 20 anos, no caso de pavimentos flexíveis. Durante esse período devem suportar o tráfego e os agentes atmosféricos a que estão sujeitos.

2.2.1 Constituição de Pavimentos Flexíveis

A constituição da estrutura de um pavimento flexível baseia-se em duas componentes: camadas estabilizadas com ligantes (hidrocarbonados), na parte superior, e camadas granulares, estabilizadas mecanicamente, em regra, na parte inferior [Pereira e Miranda, 1999].

A existência de duas famílias de materiais distintas deve-se ao facto de apresentarem um comportamento mecânico diferente. A parte superior das camadas tem como função resistir aos esforços de tracção, enquanto que a parte inferior das camadas, tem a função de resistir a esforços de compressão.

As camadas são colocadas por ordem decrescente de capacidade estrutural. A camada superficial deverá ter capacidade de resistir ao rolamento das cargas, logo deve ser composta por materiais de melhor qualidade e mais caros, ao passo que nas camadas inferiores sucede o contrário. Assim, geralmente, os pavimentos são constituídos por:

- **Camada de Desgaste**

A camada de desgaste tem que apresentar boas características superficiais, que permitam aos utilizadores uma condução cómoda, segura e económica. Para que tais objectivos se atinjam, a camada de desgaste tem que apresentar uma superfície que possibilite uma boa aderência entre o pavimento e as rodas dos veículos, que assegure uma rápida eliminação da água do pavimento em tempo de chuva e que apresente um valor de ruído diminuto.

A nível estrutural, a camada de desgaste deve contribuir para a capacidade global do pavimento, distribuindo as tensões induzidas pelas cargas rolantes e deve ser impermeável de modo a que as camadas subjacentes fiquem protegidas de eventuais infiltrações.

As camadas de desgaste em betão betuminoso drenante são excepção no que se refere à impermeabilidade. Tratam-se de camadas que apresentam um elevado grau de porosidade para que toda a água que caia sobre esse tipo de revestimento se infiltre e circule nos vazios, de modo a não permitir acumulação de água na superfície do pavimento. Este tipo de camadas requer que a camada subjacente seja impermeável.

As camadas de desgaste devem ser capazes de suportar os efeitos agressivos do tráfego e do clima [Watson, 1989].

- **Camada de Regularização**

Na generalidade dos pavimentos, a camada de regularização encontra-se imediatamente sob a camada de desgaste. Trata-se de uma camada que tem que ser executada de forma a apresentar uma superfície desempenada, para que a camada de desgaste seja posteriormente colocada sem problemas. Em soluções em que a camada de desgaste é constituída por betão betuminoso drenante, deverá a camada de regularização ser composta por materiais com características impermeáveis, para evitar infiltrações nas camadas subjacentes.

Tem ainda uma função em comum com todas as camadas que constituem um pavimento flexível, distribuir as tensões induzidas pelo tráfego.

- **Camada de Base**

Trata-se de uma camada situada entre a camada de desgaste e a sub-base ou solo de fundação [LNEC, 1962].

Estruturalmente, a camada de base é a camada mais importante. Desta camada é esperado que suporte e degrade as cargas aplicadas de forma que a capacidade de suporte das camadas subjacentes não seja excedida [O’Flaherty, 1962]. Trata-se de uma camada composta por materiais granulares tratados (com ligantes betuminosos) ou não tratados. É importante que estes sejam de boa qualidade, devido a tratar-se de uma camada com espessuras elevadas.

- **Camada de Sub-base**

A sub-base é uma camada do pavimento menos resistente do que a base, situada entre esta e a fundação [LNEC, 1962]. É composta por materiais granulares de granulometria extensa e/ou por solos seleccionados, e é importante no processo construtivo pois permite distribuir as tensões induzidas pelo tráfego, serve de amparo às camadas superiores, possibilita a compactação da base em boas condições e garante a traficabilidade do equipamento de obra. A espessura deste tipo de camada depende sobretudo do tipo de tráfego e da resistência do solo de fundação. A sua correcta execução depende de uma boa compactação realizada por partes e com teores de humidade correctos.

Outra função desta camada prende-se com as suas funções drenantes, ajudando a proteger as camadas superiores da água capilar funcionando como barreira, ajudando também a drenagem interna do pavimento, quando é concebida para tal [Azevedo, 2005].

- **Leito do Pavimento**

Esta camada evita a deformação do solo e serve de base construtiva, possibilitando a compactação da base e da sub-base. Tem ainda como objectivo, eliminar ou diminuir os problemas subseqüentes da heterogeneidade dos materiais de fundação. O seu emprego a curto prazo permite a circulação dos equipamentos aquando da construção de uma estrada e protege os solos subjacentes contra a acção dos agentes atmosféricos. A longo prazo, visa abonar a plataforma do pavimento, com uma capacidade de suporte homogénea e conciliável com os valores de dimensionamento, resguarda os solos sensíveis ao gelo através de uma protecção térmica, afiança uma boa drenagem e/ou evita a ascensão capilar das águas do sub-solo e impede a contaminação da sub-base ou da base pelos finos do solo.

Actualmente, esta camada é constituída por materiais granulares não tratados ou tratados com outros solos, com ligantes hidráulicos (cal e/ou cimento). Por vezes opta-se pela utilização conjunta com geotêxteis. Esses ajudam a evitar a contaminação de outras camadas pelos finos e têm ainda a função drenante.

- **Terreno de Fundação**

O terreno de fundação serve de suporte ao pavimento e são as suas características que condicionam o seu dimensionamento [Azevedo, 2005]. A fundação dos pavimentos pode ser constituída por quase todo o tipo de solos ou de rocha. Contudo, no caso da existência de solos finos e plásticos, podem existir algumas dificuldades no suporte do tráfego de estaleiro e exibir a pequena capacidade de carga quando em presença de água, tanto a curto como a longo prazo [Jacinto, 2003].

Todavia, existem factores, como a melhoria do processo construtivo ou a existência de um bom solo de fundação, que podem justificar a eliminação ou reduzir a espessura de algumas camadas, como a camada de regularização ou a camada de sub-base. É de salientar, que as camadas betuminosas ficam ligadas entre si através de regas de colagem e a interligação das camadas betuminosas com as camadas granulares realiza-se através de regas de impregnação com emulsões betuminosas. Assim, resulta um conjunto, que fica submetido a um estado de tensão que no plano horizontal evolui de uma situação de tensão de compressão máxima na face superior da camada de desgaste até atingir um valor máximo de tensão de tracção na face inferior da última camada.

A Figura 2.1 ilustra a forma como os pavimentos flexíveis, na generalidade são, constituídos:

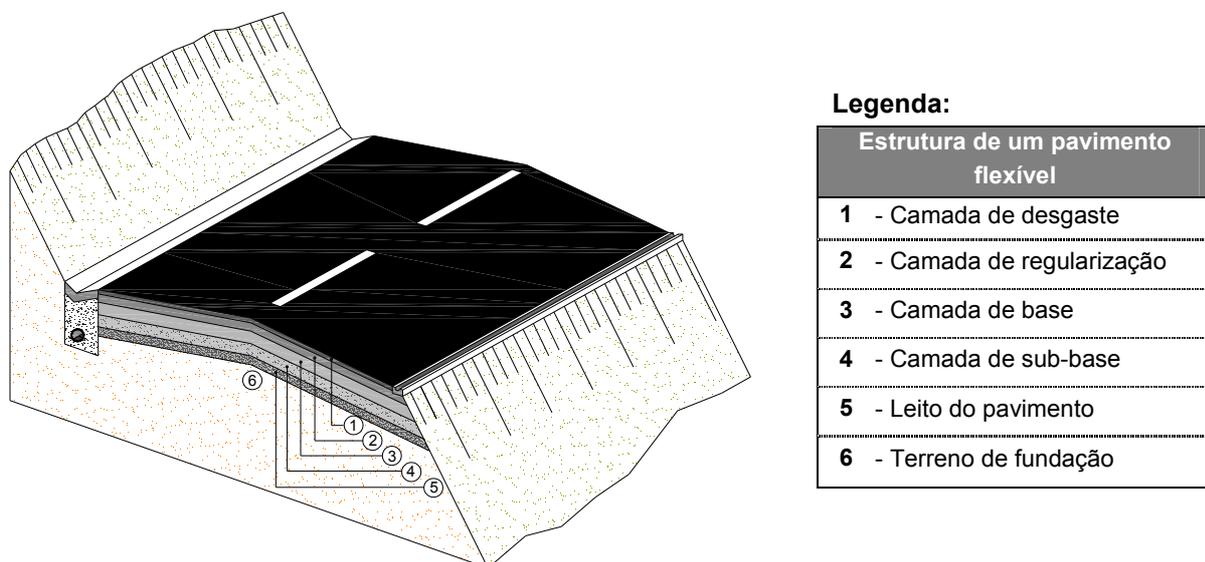


Figura 2.1 – Estrutura de um pavimento flexível

2.3 Gestão da Conservação

As vias de comunicação são essenciais para o desenvolvimento global de uma sociedade. Assim, torna-se fundamental mantê-las, em condições tais, que garantam segurança e comodidade aos utentes e assegurem economicamente os investimentos realizados. Esses objectivos só são alcançados, recorrendo à elaboração de análises sistemáticas da informação relativa à rede rodoviária, tendo em conta o seu estado de qualidade ao longo do tempo. A análise permanente, permite avaliar/medir parâmetros de modo a [Haas e Hudson, 1978]:

1. Fornecer dados para avaliar opções de projecto e actualizá-los se necessário;
2. Reprogramar medidas de reabilitação com base nessa actualização;
3. Fornecer dados para uma melhoria das técnicas de construção e manutenção;
4. Fornecer informações para a actualização de *software* de gestão de pavimentos.

A informação obtida através dessas análises, permite desenvolver programas de conservação da rede rodoviária, que possibilitam otimizar os recursos económicos disponíveis, ou justificar um determinado nível de investimento, face a padrões de qualidade pré-definidos. Todavia, é necessário estabelecer normas e procedimentos que em conjunto constituem um sistema de gestão da conservação.

Um sistema de gestão deve ser considerado, acima de tudo, como um meio de apoio à tomada de decisão por parte de determinada entidade. Assim, a arquitectura geral de um sistema de gestão, o seu conteúdo e modo de funcionamento, devem estar estreitamente relacionados com o contexto político (muitas vezes preponderante), orgânico, técnico e económico, da entidade no qual se integra [Pereira e Miranda, 1999].

A tendência de um grande número de países é dar prioridade à conservação, pelo menos desde os anos 60 que se tem vindo a assistir ao desenvolvimento dos sistemas de gestão da conservação, cuja implementação foi motivada pelos seguintes factores [OCDE, 1984]:

1. Envelhecimento das redes de estradas nos países industrializados, que alertou para a necessidade de preservação de redes;
2. As restrições orçamentais crescentes;
3. O reconhecimento do estado dos pavimentos nos custos dos utentes das vias;
4. A tomada de consciência dos custos sociais e ambientais efectuados pelo transporte rodoviário e pelas características das camadas de desgaste;
5. O desenvolvimento tecnológico ocorrido no domínio da pavimentação;
6. A capacidade de caracterizar o estado dos pavimentos através de equipamentos de medida;
7. O avanço dos sistemas informáticos, nomeadamente a existência de computadores e de sistemas de informação;
8. O desenvolvimento generalizado e a tomada em consideração dos métodos de gestão.

Num sistema de gestão de pavimentos, consideram-se os seguintes parâmetros Figura 2.2:

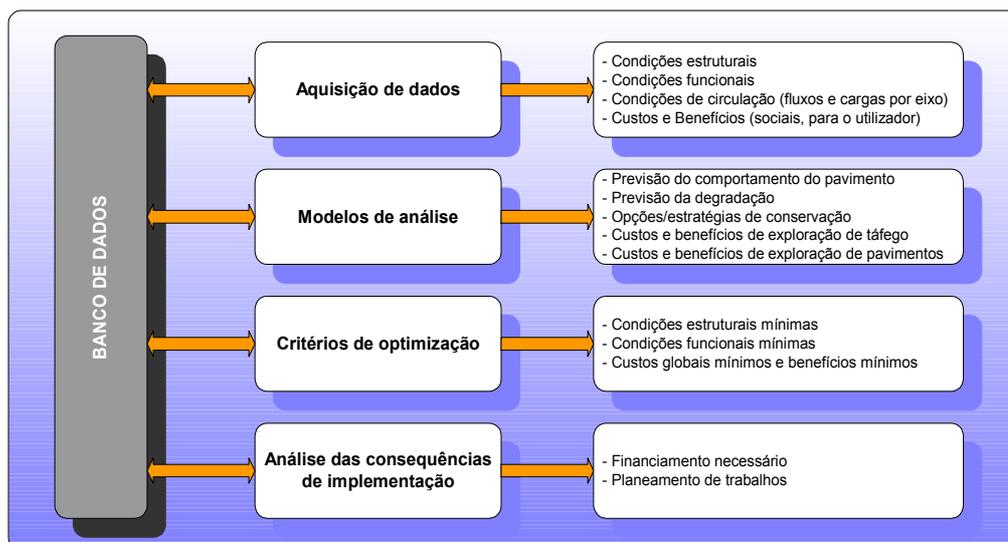


Figura 2.2 – Parâmetros de um sistema de gestão de pavimentos⁴

Depois de recolhidos e analisados todos os dados, a decisão mais difícil de tomar é como reabilitar o pavimento de uma maneira rentável. Tal só é possível com uma informação a tempo e precisa do estado do mesmo. Estes dados têm uma importância fundamental na avaliação da funcionalidade e na determinação do método de reabilitação apropriado.

2.4 Auscultação de Pavimentos

Uma rede viária bem estruturada, bem construída e bem conservada, contribui para o desenvolvimento económico de uma comunidade, uma vez que permite deslocamentos rápidos e económicos de pessoas e mercadorias.

A qualidade de um pavimento é um factor a ter em conta num sistema de gestão. A avaliação dessa qualidade, compreende um conjunto de actividades que permite conhecer o estado do pavimento, podendo ser efectuada em períodos distintos [Azevedo, 2004]:

1. Quando a construção do pavimento é finalizada, procedendo-se à realização de ensaios que permitem avaliar a qualidade funcional e estrutural do novo pavimento, no ano zero (caracterização final de pavimentos);
2. Observação periódica, atendendo à evolução da qualidade funcional e estrutural do pavimento;
3. Observando um pavimento existente e que se pretende beneficiar, recorrendo simultaneamente a inspecções visuais e a campanhas de auscultação (caracterização das características superficiais e estruturais da situação existente).

2.4.1 Caracterização Superficial de Pavimentos Rodoviários Flexíveis

A segurança que um pavimento poderá oferecer, dependerá não só das características de traçado da estrada, mas também das características superficiais, tais como a regularidade, resistência à derrapagem, conferida pela textura superficial (rugosidade), e condições de drenagem de águas

⁴ Adaptado de [OCDE, 1984]

superficiais [Azevedo, 2001]. Actualmente, existe a preocupação de executar estradas que ofereçam todas as condições referidas anteriormente e que resistam às constantes solicitações do tráfego, durante longos anos.

No Quadro 2.1, pode-se observar a influência das características superficiais dos pavimentos na segurança e comodidade dos utentes, bem como no meio ambiente e na economia de circulação e exploração.

Factores de Influência		Exigências			
		Segurança	Comodidade	Ambiente	Economia
Aderência		■	□	□	□
Regularidade	Longitudinal	■□	■	□	■□
	Transversal	■□	■□	□	□
Resistência ao rolamento		□	□	□	■□
Ruído de contacto pneu/pavimento		□	■□	■	□
Características reflectoras		■□	■□	□	■□
Legenda:					
■ Grande influência		■□ Influência moderada		□ Influência nula	
■□ Influência marcante		□■ Influência pequena			

Quadro 2.1 – Influência das principais características superficiais dos pavimentos nas exigências dos mesmos⁵

Ao analisar o Quadro 2.1, podem-se retirar várias conclusões. A nível de segurança, a aderência dos veículos ao pavimento é muito importante, sobretudo quando chove, pois quando a aderência é diminuta podem ocorrer dois fenómenos: a hidroplanagem e a viscoplanagem. Assim, a rápida eliminação da água torna-se fundamental porque apresenta dois benefícios: um deles repercute-se na segurança e conseqüente benefício económico e o outro reside no facto de contribuir para a integridade estrutural do pavimento. Uma boa aderência entre os pneus e o pavimento permite que os condutores consigam manter a trajectória pretendida, a velocidade, sobretudo em curvas e reduz a distância de travagem.

A comodidade dos utilizadores das estradas só se consegue se as irregularidades longitudinais e transversais forem nulas. A irregularidade de um pavimento prejudica sobretudo o conforto dos condutores e indirectamente a segurança e a economia.

Os condutores, dependendo da velocidade que praticam e dependendo dos seus hábitos, sentem esta propriedade de maneira diferente. Contudo, de um modo geral, a irregularidade dos pavimentos, provoca perdas de atenção e de percepção da estrada. Podem ainda surgir dores de cabeça e náuseas, quando as oscilações sentidas são de baixa frequência, e problemas relacionados com a coluna vertebral e com órgãos internos, quando essas oscilações são mais elevadas.

A segurança dos utentes das estradas é colocada em questão, quando essas apresentam problemas de regularidade, pois estão patentes várias situações de risco como a falta de controlo do volante, a

⁵ Adaptado de [OCDE, 1984]

evidente instabilidade de circulação (principalmente dos motociclos), e a perda de aderência entre os pneus e o pavimento que contribui evidentemente para a ocorrência de acidentes uma vez que põe em causa a distância de paragem.

Na questão económica, as irregularidades presentes nos pavimentos, contribuem para uma aumento do consumo do combustível e para o desgaste dos veículos.

O ruído, actualmente é um factor com bastante influência, tanto para os condutores como para os habitantes das zonas limítrofes das estradas. O ruído é bastante incómodo, podendo mesmo influenciar os níveis de cansaço dos condutores e em casos extremos originar transtornos mentais [PIARC, 1995].

A segurança também deriva de uma boa visibilidade que se obtém das estradas. Quer em dias de chuva ou de nevoeiro, em dias de sol, de noite e de dia, a estrada deve ser sempre perceptível de modo a evitar acidentes. A condução de noite é mais perigosa pois os condutores têm um campo de visão mais diminuto. No entanto, se existir iluminação artificial essa dificuldade já não é tão evidente. Para auxiliar a condução, existe ainda a sinalização horizontal. Esta ao contrastar com a cor do pavimento, ajuda os condutores, a seguirem as trajectórias correctas e a advertirem para a existência de eventuais obstáculos. Se o seu grau de reflexão for o mais elevado, permite ainda, uma redução da intensidade da iluminação artificial, ou seja, uma redução de energia. A iluminação, quando existe, é bastante importante porque também actua ao nível da segurança rodoviária.

2.4.1.1 Técnicas de Observação Superficial de Pavimentos Rodoviários Flexíveis

As características superficiais podem ser analisadas através da observação visual, elaborando um registo do estado de conservação, para posterior tratamento. Podem ainda ser analisadas com equipamento fotográfico e de vídeo. Existem também equipamentos específicos de observação, que ajudam na detecção das degradações, sobretudo na detecção do fendilhamento.

A observação visual é realizada por um operador que se desloca ao longo da estrada, a pé ou a bordo de um veículo, registando os diferentes tipos de degradações, segundo a respectiva gravidade, em formulários específicos ou introduzindo em suporte informático o que vai observando, através de uma codificação previamente estabelecida. Pelo facto da observação visual se realizar através de um operador, existe sempre o problema da subjectividade de análise das degradações. Esse mesmo operador, pode mesmo qualificar a mesma degradação com resultados diferentes, devido a vários factores, como a incidência da luz e/ou a presença de água. Essa análise varia ainda mais, caso seja feita por dois operadores. Limitar essa subjectividade de análise torna-se importante, na medida em que a análise e a avaliação das degradações deve ser a mais homogénea possível. Assim, existem catálogos que classificam as degradações existentes na superfície dos pavimentos.

A recolha de dados realizada através de fotografia, auxilia muito a análise desses mesmos dados, pois permite que os registos possam ser analisados com mais pormenor em gabinete. Os registos obtidos por vídeo são contínuos e permitem uma análise do pavimento e da sua envolvente, podendo observar-se mais pormenores através da ampliação de certas imagens.

Nos filmes obtidos pela gravação feita em vídeo, pode-se observar os vários tipos de degradação e todos os elementos adjacentes, tais como, sistemas de drenagem, sinalização, marcos, etc.. A obtenção destes dados deve-se ao facto do veículo estar equipado com quatro câmaras.

Existe também uma ampla gama de equipamento específico para analisar as características superficiais.

O equipamento de observação com recurso a sistemas holográficos utiliza um raio laser para analisar a superfície do pavimento. O laser reflectido é captado com um laser holográfico, ou seja, quando o laser detecta uma fissura, este é absorvido e a intensidade captada diminui.

O sistema de infra-vermelhos funciona com câmaras que detectam pequenas variações de temperatura entre a superfície do pavimento e as fissuras existentes. Este tipo de sistema em tempo de chuva não permite obter resultados razoáveis, pois a presença de água interfere com as leituras de temperatura. Para se obter bons resultados, é necessário um número elevado de câmaras e essas têm que estar dotadas de boa resolução, para que os dados não sejam afectados pelos gradientes de temperatura na vizinhança das fissuras que fazem com que as fendas sejam visualizadas com uma maior dimensão.

O radar, conhecido por GPR, é um equipamento de ensaio não destrutivo destinado a obter informações em contínuo sobre uma estrutura que se encontra abaixo da superfície, possibilitando detectar o local exacto onde ocorrem mudanças na constituição dos mesmos. Este equipamento funciona através da transmissão de ondas electromagnéticas para as camadas do pavimento, com o recurso a uma antena montada num veículo. O sinal emitido pelo radar é como uma onda sinusoidal que se propaga na vertical através das várias camadas do meio a ensaiar, sendo parte dela reflectida quando choca com a fronteira entre dois materiais com constantes dieléctricas diferentes [Berg, 1984]. A cada descontinuidade eléctrica encontrada (por exemplo a heterogeneidade) produz o fenómeno de reflexão parcial, pois os materiais homogéneos provocam uma reflexão total. O tempo de propagação das ondas é convertido na profundidade através do conhecimento das velocidades de propagação das ondas. Uma das vantagens da utilização do equipamento radar é a possibilidade de diminuir o número de sondagens.

O sistema acústico funciona com base num princípio de que a energia acústica, na forma de pequenos impulsos, é transmitida para o pavimento por emissores situados na superfície do pavimento. Parte dessa energia reflecte-se nas interfaces entre materiais com impedâncias acústicas diferentes, enquanto que a restante energia continua com profundidades maiores, sendo atenuada proporcionalmente à distância percorrida. As profundidades das diferentes interfaces são calculadas tendo como base o tempo entre a transmissão e a recepção dos sinais reflectidos, sendo conhecidas as velocidades de propagação de ondas acústicas nos materiais.

2.4.2 Caracterização Estrutural de Pavimentos Rodoviários Flexíveis

A caracterização estrutural de pavimentos flexíveis baseia-se na avaliação da capacidade de carga destes. Para se realizar essa avaliação recorre-se a ensaios de carga e a inspecção visual. A caracterização da capacidade de carga só se justifica na elaboração de projectos de reabilitação a nível estrutural.

Visualmente, existem indicadores que declaram que o pavimento está com problemas internos, ou seja, visualmente podem-se observar deflexões que revelam deficiência no comportamento estrutural do pavimento. Pode afirmar-se que uma deflexão elevada pode corresponder potencialmente a um mau pavimento, no entanto, o inverso pode não ser verdadeiro, de facto, podem observar-se deflexões reduzidas em pavimentos degradados, nomeadamente ao nível da camada de desgaste. Neste caso,

apesar da capacidade estrutural poder ser considerada satisfatória, verifica-se que o pavimento está degradado, necessitando de uma intervenção com carácter funcional e, indirectamente, estrutural [Pereira e Miranda, 1999]. A medição da deflexão de um pavimento pode ser utilizada tendo em vista vários objectivos [Pereira e Miranda, 1999]:

1. Como valor caracterizador de deformabilidade global de um pavimento – conhecida a estrutura do pavimento, é utilizado para avaliar a qualidade residual;
2. Como dado para calibração dos modelos analíticos, com o objectivo de determinar as tensões e deformações produzidas por uma determinada carga;
3. Para dimensionar as camadas de reforço, cuja eficácia para a rigidez do pavimento é avaliada através da redução do valor da deflexão após o reforço;
4. Para definir a qualidade estrutural do pavimento de modo a determinar classes de deflexão para posterior utilização em sistemas de gestão.

Os ensaios de carga, que permitem a medição da reflexão são: os ensaios de carga destrutivos e os ensaios de carga não destrutivos. Os ensaios de carga não destrutivos são mais expeditos, caracterizando de uma forma mais completa os pavimentos em estudo. Os ensaios de carga destrutivos apresentam a grande desvantagem, a destruição localizada dos pavimentos em observação.

Posteriormente, os resultados dos ensaios anteriormente referidos são analisados e avaliados para depois se proceder ao dimensionamento do reforço.

2.4.2.1 Técnicas de Avaliação da Capacidade Estrutural

A avaliação da capacidade de carga de um determinado pavimento sem o destruir é altamente desejável. Para o conseguir, os ensaios devem ser realizados à superfície do pavimento, e os resultados devem reflectir de alguma forma as propriedades dos troços ensaiados [Jacinto, 2003]. As técnicas de avaliação da capacidade estrutural não destrutivos dividem-se em dois tipos: ensaios onde a carga é transmitida de forma estática ou quase estática e ensaios de cargas repetidas ou dinâmicas.

A resposta do pavimento a uma carga estática ou quase estática é geralmente conseguida através da obtenção da deflexão da superfície do pavimento sobre a carga aplicada [Jacinto, 2003]. As medições obtidas com os equipamentos de carga estática, são muito morosas devido ao tipo de medição ser quase estática.

Quanto aos ensaios de cargas repetidas, esses são semelhantes aos ensaios de carga estática, consistindo na colocação de uma viga metálica no pavimento, com uma ponta colocada próxima de uma roda que transmite uma determinada carga ao pavimento. Assim, à medida que a carga se desloca regista-se o movimento na vertical ou apenas o valor da deflexão no centro da carga.

As técnicas de avaliação da capacidade estrutural destrutivos, são um complemento da análise que se realiza a um pavimento, com a finalidade de identificar em certos locais as verdadeiras causas das degradações. Para se realizar este tipo de ensaios, a estrutura do pavimento é destruída de modo a retirar amostras para a realização de ensaios.

No Quadro 2.2, podem-se observar os ensaios e os equipamentos que permitem realizar uma avaliar a capacidade estrutural de um pavimento.

Técnicas de Avaliação da Capacidade Estrutural		
Não Destrutivos	Ensaio de Carga Estática	<ul style="list-style-type: none"> - Ensaio de placa - Viga Benkleman - Deflectómetro Lacroix - Curviâmetro
	Ensaio de Cargas Repetidas	<ul style="list-style-type: none"> - Vibradores - Deflectómetro de impacto - Retracção sísmica - Curviâmetro
Destrutivos	Sondagens à rotação Poços de inspecção Cone de penetração dinâmico	

Quadro 2.2 – Técnicas de avaliação da capacidade estrutural

2.5 Degradação de Pavimentos Rodoviários Flexíveis

Os pavimentos estão permanentemente submetidos a vários tipos de agentes que contribuem para uma diminuição das características superficiais e estruturais. Efectivamente, as degradações nos pavimentos são devidas à acção conjunta do tráfego, principalmente o pesado, e acções atmosféricas, como sejam a temperatura e a água [Azevedo, 2000/2001].

A solicitação do tráfego nos pavimentos, é mais relevante conforme o tipo de veículos que neles circulam, da velocidade que os condutores praticam e do tempo de solicitação. A acção sucessiva de cargas provoca estados de tensão e extensão nos pavimentos, impondo-lhe deformações. Provoca ainda, fadiga dos materiais, de tal forma que leva os pavimentos à ruína.

O comportamento dos pavimentos flexíveis é bastante influenciado pelos agentes atmosféricos e é sobretudo bastante vulnerável ao efeito das temperaturas, uma vez que altera a rigidez dos materiais ligados com betume.

Quanto ao efeito da água nos pavimentos, este pode-se considerar como o inimigo de topo. Uma boa drenagem pode evitar muitos problemas. A presença de água nos pavimentos, provoca a ruína tanto externamente (na camada de desgaste) como internamente (nas camadas granulares e na fundação). Os pavimentos ao serem constituídos pelos mais diversos materiais, é natural que sob condições climáticas, ocorram alterações dentro das suas estruturas, originando tensões e deformações tanto externas como internas.

Uma má concepção ou execução das operações de terraplenagens, pavimentação ou de drenagem, podem ser a causa das degradações de um pavimento, bem como a utilização de materiais inadequados ou a má formulação de materiais.

As causas de degradação anteriormente descritas, podem ser observadas, de uma forma sucinta no Quadro 2.3.

Agentes de Degradação	
Acções sobre o pavimento	Tráfego
	Temperatura
	Água
Má execução durante a construção (terraplenagens, pavimentação, sistemas de drenagem)	
Formulação deficiente e materiais inadequados	

Quadro 2.3 – Agentes/Causas de degradação⁶

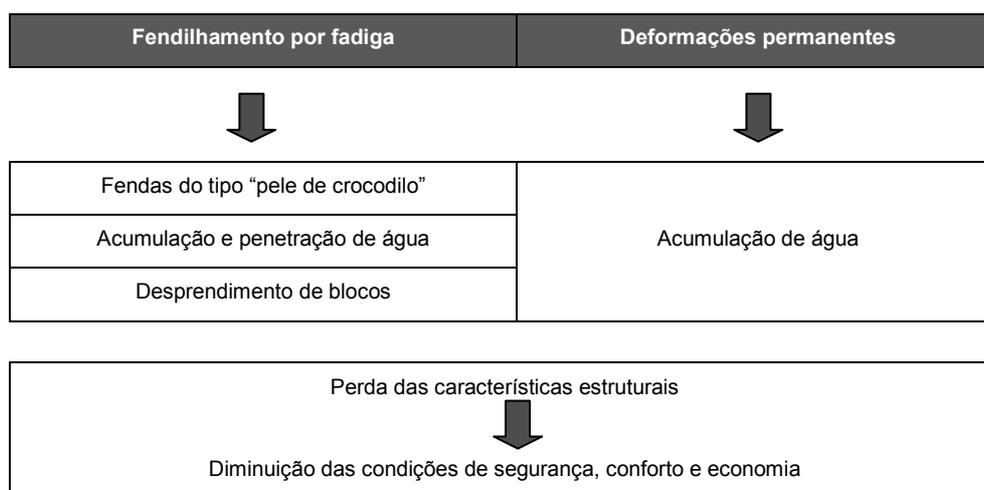
Um pavimento que exiba degradações, conseqüentemente, não oferece segurança nem conforto aos seus utentes. As degradações nos pavimentos podem dividir-se em duas famílias: a degradação das características superficiais e a degradação das características estruturais.

- **Degradações das características superficiais**

As degradações das características superficiais afectam sobretudo o comportamento funcional da superfície do pavimento. A sua evolução conduz à perda das características estruturais resultando mesmo na ruína do pavimento.

- **Degradações das características estruturais**

As degradações das características estruturais traduzem-se pelo aparecimento à superfície do pavimento de fendas e de cavados de rodeira (deformações permanentes) devido à falta de capacidade da carga do solo de fundação. Estas degradações permitem a acumulação de água e por vezes a penetração de água para as camadas inferiores do pavimento, que sob a acção conjunta de outras acções conduzem à ruína do pavimento. A evolução destas degradações conduz à perda das características superficiais, com a conseqüente diminuição das condições de segurança, conforto e economia [Azevedo, 2000/2001]. No Quadro 2.4 pode-se observar a evolução e o efeito das degradações das características estruturais.

Quadro 2.4 – Evolução e efeito das degradações estruturais⁷

⁶ Fonte: [Azevedo, 2000/2001]

As degradações dos pavimentos, caso não sofram intervenções de reabilitação, evoluem até atingirem a rotura ou seja a ruína dos pavimentos [Vicente, 2002].

Consideram-se dois critérios de ruína nos pavimentos flexíveis: a fadiga por tracção das camadas ligadas, que ocorre habitualmente na base das camadas ligadas, onde surge o início da fissuração, propagando-se através de toda a espessura do pavimento e surgindo à superfície deste, e a deformação permanente à superfície do pavimento, originada pela soma das deformações ocorridas em todas as camadas [Pereira e Miranda, 1999].

Uma degradação pode surgir isolada no pavimento, no entanto, a sua evolução promove novos tipos de degradação, que intervêm na primeira. Assim, poder-se-á afirmar que umas degradações são consequência de outras.

2.6 Patologias em Pavimentos Rodoviários Flexíveis

Como já foi referido anteriormente nesta dissertação, um pavimento rodoviário tem como objectivo primordial permitir que os seus utentes circulem com o menor transtorno possível relativamente ao conforto, à segurança e à economia. No entanto, tais objectivos nem sempre são conseguidos devido a patologias que surgem e se desenvolvem diminuindo a qualidade inicial do pavimento. As origens e o desenvolvimento dessas patologias surgem devido a muitos factores. Um desses factores assenta no problema das estradas durante a sua construção, estarem sujeitas a variações atmosféricas. Além desse problema surgem ainda outros, como a má execução dos diversos trabalhos, desajustados métodos construtivos, utilização de materiais impróprios ou até mesmo má formulação de materiais, especialmente os betuminosos.

Após a construção, as solicitações continuam, de tal modo, que as propriedades resistentes dos materiais constituintes diminuem com a repetição de aplicação de cargas (tráfego pesado) e com a acção dos agentes atmosféricos, conduzindo a uma modificação de comportamento global do pavimento.

A evolução das degradações, aparentes ou não, de um pavimento, apoia-se no “princípio da cadeia de consequências”, onde uma degradação não evolui isoladamente no tempo, antes dá origem a novos tipos de degradações, as quais, por sua vez, interferem mutuamente. Considera-se assim o processo de degradação de um pavimento dependente de dois grupos de factores: os factores passivos, característicos da pavimento construído (espessura das camadas, materiais utilizados, qualidade de construção), e os factores activos, principais responsáveis pela degradação, compreendendo as acções do tráfego e do clima [Pinto, 2003].

Em fase de projecto, é de salientar, que existem muitas patologias que podem ser evitadas ou diminuídas. Para tal, é necessário recorrer a descrições pormenorizadas da metodologia a adoptar para execução dos trabalhos e dos materiais a empregar.

Os estudos referentes às diferentes especialidades como a drenagem devem contemplar um eficiente estudo sobre o sistema de escoamento de águas a adoptar.

⁷ Adaptado de [Azevedo, 2000/2001]

Os estudos referentes à pavimentação devem ser baseados em estudos geológicos e correctos estudos de tráfego, de modo a se adoptarem correctas estruturas de pavimento com correctos materiais a aplicar.

O estudo do traçado também é muito importante, no sentido em que se podem evitar muitos problemas, como por exemplo a construção de estradas em zonas cujos solos apresentam uma deficiente capacidade de suporte como sucede nas baixas aluvionares.

2.6.1 Famílias e tipos de patologias em pavimentos flexíveis

As patologias, que surgem nos pavimentos flexíveis, com o passar do tempo, tornam-se mais expressivas, de tal forma, que contribuem para uma forte redução da qualidade das características superficiais e estruturais do pavimento. As degradações estruturais e superficiais estão interligadas de tal forma, que a evolução de uma pode ser consequência da outra. As manifestações das degradações estruturais, normalmente despontam na superfície através de fendas, deformações e desagregações, permitindo assim a acumulação e posterior infiltração de água nas camadas inferiores do pavimento. Com a evolução dessas degradações, as características superficiais diminuem, contribuindo para uma redução das condições de segurança, conforto e economia. O oposto, também pode suceder, porque as degradações superficiais podem desenvolverem-se de tal forma que diminuem as características estruturais.

Os pavimentos flexíveis, têm uma ampla gama de manifestações de degradação, as quais são descritas no Quadro 2.5.

Manifestação	Tipos de Degradação	
Fendilhamento	Fendas	- Fadiga - Longitudinais - Transversais
	Pele de crocodilo	- Malha fina - Malha larga
Deformações	Deformações localizadas	
	Ondulações de superfície	
	Cavados de rodeira	- Grande raio (camadas inferiores) - Pequeno raio (camadas superiores)
	Abatimentos	- Longitudinal - Transversal
Desagregações Superficiais	Desagregação da camada de desgaste	
	Peladas	
	Ninhos	
Movimento de materiais	Exsudação	
	Subida de finos	

Quadro 2.5 – Manifestações dos vários tipos de degradações

- **Fendilhamento**

As camadas superficiais dos pavimentos rodoviários flexíveis apresentam com frequência este tipo de degradação. Trata-se de uma patologia resultante da fadiga dos materiais das camadas betuminosas, devido sobretudo, às solicitações frequentes dos esforços de tracção por flexão que nelas actuam. Porém, existem ainda, outras causas que originam este tipo de degradação, como a falta de capacidade de suporte das camadas granulares e de fundação, a deficiente qualidade e formulação dos materiais utilizados (especialmente dos betuminosos), falhas nos métodos construtivos, condições atmosféricas adversas e o problema associado ao diferencial de rigidez entre as camadas inferiores e as superficiais, ou seja, um pavimento, pode apresentar camadas inferiores com uma capacidade de suporte deficiente contradizendo com as camadas superiores com uma elevada rigidez.

O aparecimento deste tipo de patologia nos pavimentos rodoviários flexíveis traduz-se num sinal de diminuição das qualidades estruturais.

As fendas das camadas inferiores podem evoluir para as camadas superiores por reflexão ou propagação. A reflexão das fissuras sucede quando uma camada de pavimento nova é executada sobre uma camada existente já fissurada, enquanto que a propagação acontece quando as fendas das camadas inferiores se propagam até à superfície [Pinto, 2003].

A evolução das fendas passa normalmente pelo aumento das suas dimensões, pela formação de malhas (pele de crocodilo), permitindo a penetração de águas, que se infiltra nas camadas inferiores, enfraquecendo-as dando origem à pele de crocodilo, ao fenómeno de bombagem dos finos e à formação de ninhos.

Salienta-se que o fendilhamento em climas com temperaturas muito baixas, surge devido à retracção dos materiais, no entanto, com o aumento das temperaturas e com a chegada do verão, os materiais começam a dilatar e as fendas podem mesmo desaparecer.

- **Deformações**

Este tipo de degradação surge devido a falta de capacidade de suporte das camadas granulares e/ou do solo de fundação em zonas pontuais do pavimento, que progressivamente se vão realçando com a acção conjunta de tráfego e acções atmosféricas.

As deformações localizadas podem ser observadas quando, em zonas pontuais, o solo de fundação apresenta bolsas de argila e/ou drenagem deficiente, mas também podem aparecer quando existe contaminação das camadas granulares.

Normalmente, a evolução deste tipo de manifestação, está associada a outros tipos de patologias, como por exemplo a pele de crocodilo, irregularidades, etc..

Este tipo de patologia também pode ter origem numa má distribuição do ligante (causado por deficiências construtivas do pavimento), em camadas de betão betuminoso em que ocorra o arrastamento da mistura por excessiva deformação plástica devido à acção do trânsito ou resultante da deformação da fundação [Pinto, 2003]. Assim, conclui-se que as deformações podem ocorrer apenas a nível das camadas betuminosas superiores, em particular da camada de desgaste ou podem ocorrer devido a deformações das camadas inferiores sobretudo do solo

de fundação. Estas últimas degradações, apresentam deformações com maiores profundidades, permitindo a acumulação de água e contribuindo para a ocorrência de acidentes.

- **Desagregações Superficiais**

As desagregações superficiais traduzem-se na fragmentação sobretudo da camada de desgaste. Esta com o tempo perde características que conferem estabilidade de ligação entre os diversos agregados constituintes.

Trata-se de um mecanismo de ruína, em que a água é o principal contribuinte, no entanto, existem muitos mais mecanismos que contribuem para a desagregação, como a má formulação das misturas betuminosas; o emprego de materiais desadequados; os erros na construção; a deficiente ligação da camada de desgaste à camada inferior; as camadas de desgaste com espessuras reduzidas e/ou a contaminação do pavimento por combustíveis.

- **Movimento de Materiais**

O movimento de materiais é um tipo de degradação que surge devido a deslocamentos de materiais que ocorrem no interior das camadas betuminosas e granulares.

O excesso de ligante, a redução da viscosidade do mesmo, a deficiente formulação das misturas betuminosas, a inadequada dosagem de agregados e a contaminação que pode ocorrer através da aplicação excessiva de rega de colagem, são factores que contribuem para o aparecimento da exsudação. Esta degradação surge em particular na zona de passagem dos rodados, conferindo-lhe um aspecto negro e brilhante, devido à redução da macrotextura do pavimento. É de salientar, que rígidas condições atmosféricas em conjunto com o tráfego concorrem para amplificar o problema da exsudação.

A água, como principal inimigo da estrada, penetra nas fendas que existem na superfície dos pavimentos e infiltram-se atingindo as camadas granulares e o solo da fundação. Com o efeito da passagem dos veículos, o pavimento sofre compressões que levam a que as águas que ficam retidas nas camadas inferiores aflorem à superfície transportando os finos das camadas. É deste modo que despontam à superfície, especialmente junto a fendas, manchas de cor esbranquiçada.

- **Reparações**

As reparações não se devem considerar uma patologia, contudo indicam que o pavimento em locais pontuais apresenta problemas relacionados com deficiências estruturais prematuras em relação ao restante pavimento. Esses locais necessitam de um zelo acrescentado, pois a sua evolução leva a um rápido aparecimento de outras degradações.

2.7 Dimensionamento e Análise de Reforços de Pavimentos Flexíveis

Os pavimentos rodoviários, uma vez construídos, sob a acção de diversos factores como os climáticos e os do tráfego, vão sofrendo várias degradações. Estas interferem na qualidade de circulação dos condutores e reduzem a aptidão do pavimento para suportar as mais variadas cargas. Assim, torna-se necessário acompanhar a evolução das degradações, para que se proceda a determinadas intervenções

para repor a qualidade inicial dos pavimentos. Muitas vezes, essa qualidade só é conseguida com o reforço do pavimento existente. Com o reforço do pavimento, pretende-se recuperar as características estruturais e consequentemente as características superficiais. Com a aplicação de uma espessura adicional de materiais betuminosos a vida útil do pavimento também é acrescida.

Em geral os métodos de dimensionamento de reforço de pavimentos são idênticos aos métodos de dimensionamento de pavimentos novos, obtendo-se as espessuras de reforços a aplicar, comparando a estrutura que se obtém pelo dimensionamento, efectuado para o tráfego que o pavimento após reforço terá de suportar, com a estrutura do pavimento existente. Nessa comparação deve-se ter em conta a história do pavimento existente e se possível quantificar o seu desgaste [Barbosa, 1984].

Um bom método de reforço de pavimentos deverá assim, não só permitir a determinação de espessuras necessárias para prolongar a vida útil de pavimentos, que apresentem uma grande variedade de condições estruturais, a fim de lhes permitir suportar um dado tráfego suplementar, mas também permitir prever a duração da vida residual de um pavimento, a fim de se poder programar o seu reforço, para se chegar à solução mais económica possível [Barbosa, 1984].

2.7.1 Métodos para Determinação do Modelo de Comportamento Estrutural

Os métodos mais utilizados, para dimensionamento de pavimentos, são os métodos empíricos. Os métodos empíricos são de fácil utilização, pois, através de ábacos consegue-se obter a espessura do reforço. Estes, baseiam-se em correlações estabelecidas entre a deflexão medida com um determinado equipamento e a vida restante do pavimento [Azevedo, 2005].

Os parâmetros necessários aos métodos analíticos, são o módulo de deformabilidade (E) e o coeficiente de *Poisson* (ν) dos diferentes materiais.

O módulo de deformabilidade, que define a relação entre as tensões e as deformações, dos materiais constituintes das camadas de um pavimento existente, pode ser determinado de duas formas: em laboratório, através por exemplo do ensaio triaxial dinâmico (solos) e de compressão diametral ou flexão (misturas betuminosas) e analiticamente, através da análise dos módulos de elasticidade a partir das bacias de deflexão. Os métodos para determinação do módulo de elasticidade são classificados em dois grupos: iterativos e simplificados.

O coeficiente de *Poisson* define a relação entre as deformações radiais e axiais dos materiais [Jacinto, 2003]. Na maioria dos casos, trata-se de um valor definido para cada tipo de material.

Para se recorrer a este tipo de métodos, é necessário obter uma série de informação: tráfego (número de eixos padrão de 80 kN ou 130 kN), características do solo de fundação e características do pavimento existente (factores de equivalência).

Trata-se do estabelecimento do modelo de comportamento estrutural do pavimento (módulos de deformabilidade e espessuras das camadas), com base em resultados de ensaios de carga e sondagens [Azevedo, 2005].

Na Figura 2.3, encontra-se patente o procedimento geral a adoptar na avaliação da capacidade de carga e do reforço de pavimentos, salientando o estabelecimento do modelo de comportamento estrutural, uma vez que aí reside a grande diferença entre o dimensionamento de um pavimento novo e a avaliação da capacidade de carga e dimensionamento do reforço de um pavimento existente.

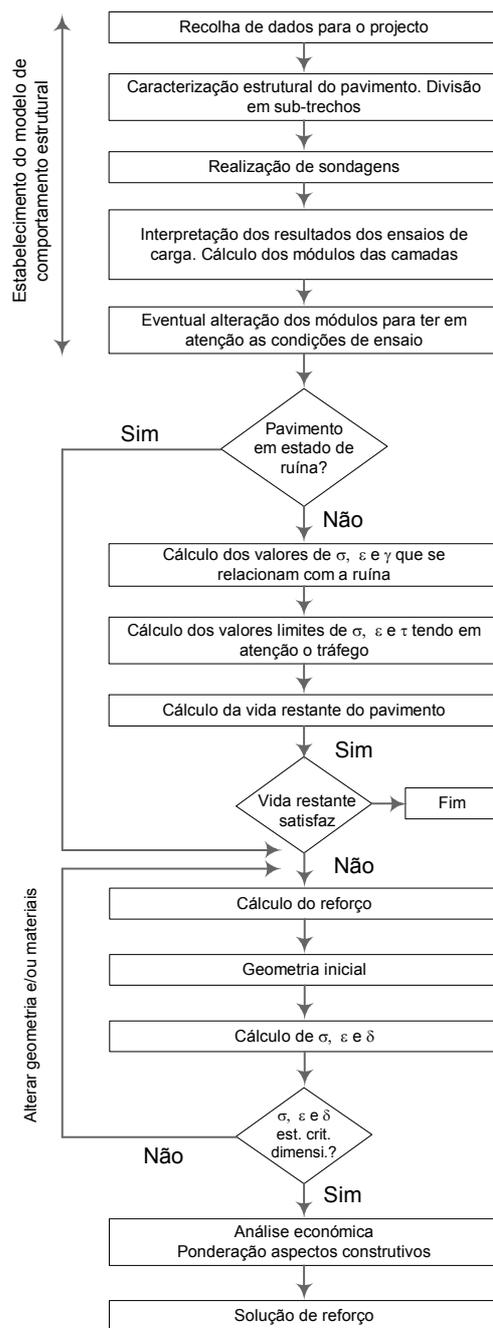
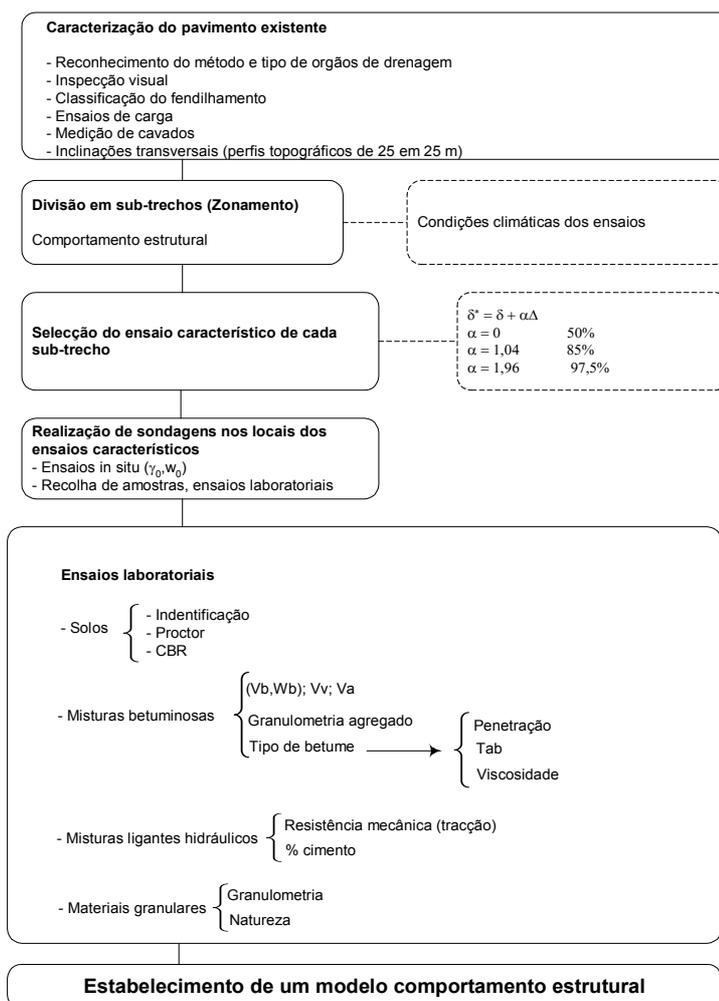


Figura 2.3 – Fases de avaliação da capacidade de carga de um pavimento⁸

2.7.2 Metodologia de um Estudo de Reforço de Pavimentos Flexíveis

Para se realizar um estudo de reforço de pavimentos é necessário seguir uma certa metodologia, como se pode verificar na Figura 2.4.

⁸ Adaptado de [Pinelo, 1991]

Figura 2.4 – Metodologia de um estudo de reforço⁹

Segundo Azevedo¹⁰, a reabilitação de pavimentos flexíveis pode ser dividida em três níveis:

- Nível 1 – Estudo de reabilitação das acções de conservação urgentes a implementar num pavimento não considerando medidas de reforço;
- Nível 2 – Estudo do dimensionamento do reforço de um pavimento utilizando um método simplificado;
- Nível 3 – Estudo do dimensionamento do reforço de um pavimento por via analítica.

Nesta dissertação, só será analisado o estudo do nível 3, pois esse baseia-se em grande parte na utilização de informação descrita anteriormente neste capítulo.

A elaboração de um projecto de reabilitação de um pavimento, por via analítica, baseia-se num método racional, que recorre ao cálculo de estados de tensão e de deformação induzidos na estrutura no pavimento e na fundação, quando sofre solicitações pelos eixos dos veículos pesados.

Os estados de tensão e de deformação são determinados admitindo um modelo de comportamento em que o pavimento é assimilado a um conjunto de camadas sobrepostas assentes sobre a respectiva

⁹ Adaptado de [Azevedo, 2001]

¹⁰ [Azevedo, 2001]

fundação, admitindo-se que os materiais existentes nas camadas do pavimento possuem características de isotropia e comportamento elástico-linear [Azevedo, 2001].

Quanto às características de deformabilidade das camadas do pavimento, obtêm-se a partir de ensaios de carga realizados ao longo do pavimento. As características mecânicas das camadas de reforço são atribuídas em função do tipo de materiais e em função das características climatéricas da região da estrada que se pretende reabilitar.

Para efeitos de dimensionamento, os estados limites de ruína considerados, no caso de pavimentos flexíveis são os seguintes [Azevedo, 2001]:

1. Limitar a extensão máxima horizontal da tracção na zona inferior das camadas betuminosas;
2. Limitar a extensão máxima vertical de compressão no topo da fundação do pavimento.

O limite das extensões, é atribuído de acordo com o número de eixos padrão durante o período de vida do projecto, normalmente 10 anos.

Para a execução de um projecto de reforço de um pavimento flexível têm que se considerar vários dados, que estão relacionados com as características resistentes dos materiais e as acções a que o pavimento está submetido (nomeadamente o tráfego e as condições climatéricas) e que influenciam a vida do pavimento.

- **Tráfego**

Para efeitos de dimensionamento de pavimentos rodoviários, apenas se considera o tráfego de veículos pesados.

Geralmente, o tráfego é expresso em número equivalente de passagens de um dado eixo padrão.

O estudo de tráfego, define o tráfego médio diário anual de veículos pesados (TMDA_p), por sentido de circulação, na via mais solicitada, ao longo do período de dimensionamento. Para calcular na via mais solicitada, o valor do TMDA_p, é afectado com um factor de redução igual a 0,9 ou 0,8, conforme existam duas ou mais vias em cada sentido.

Segundo Jacinto¹¹, para exprimir o efeito de um dado número acumulado de veículos pesados com características muito diversas, faz-se a conversão em passagens equivalentes de um eixo padrão, adoptando-se para tal um factor de agressividade a que pode ser obtido a través da Equação 1.

$$a = k \times \left(\frac{P}{P_0} \right)^\alpha$$

Equação 1

onde:

a – representa a agressividade do eixo de carga P ;

¹¹ [Jacinto, 2003]

α – em estruturas flexíveis considerar o valor 5;

k – coeficiente que depende do tipo de eixo, que depende dos seguintes valores:

- Eixo simples = 1
- Eixo duplo = 2
- Eixo triplo = 1,1

Caso o espectro de cargas dos veículos seja conhecido, o factor de agressividade, baseia-se na Equação 2.

$$FA = \frac{1}{NVP} \times \left[\sum_i i \sum_{j=1}^3 K_j n_{ij} \left(\frac{P_i}{P_0} \right)^\alpha \right]$$

Equação 2

onde:

FA – factor agressividade;

NVP – número de veículos pesados no período de análise;

K_j – coeficiente que depende do tipo de eixo, que depende dos seguintes valores:

- Eixo simples = 1
- Eixo duplo = 2
- Eixo triplo = 3

n_{ij} – número de eixos elementares do tipo j e da classe de cargas.

Contudo, no caso de não se dispor de informação relativa ao espectro de carga, podem ser adoptados os valores da Quadro 2.6, para os eixos padrão de 80 e 130 kN.

Classe	TMDA _p	80 kN	130 kN
T7	< 50	-	-
T6	50-150	2	0,5
T5	150-300	3	0,6
T4	300-500	4	0,7
T3	500-800	4,5	0,8
T2	800-1200	5	0,9
T1	1200-2000	5,5	1,0
To	> 2000	-	-

Quadro 2.6 – Factores de agressividade¹²

¹² Adaptado de [JAE, 1995]

2.7.3 Dimensionamento do Reforço

Para dimensionar as camadas de reforço, torna-se necessário definir critérios de fadiga e as características dos materiais a utilizar, tendo em atenção para o facto de caracterizar a vida das restantes camadas betuminosas por forma a definir o desempenho estrutural do pavimento após a reabilitação de reforço.

- **Crítérios de fadiga**

Segundo Azevedo¹³, para o dimensionamento da estrutura projectada, limita-se simultaneamente, a extensão máxima da tracção admitida nas camadas betuminosas, e a extensão máxima vertical de compressão no topo da fundação podendo para o efeito serem utilizados os critérios do manual da *SHELL* (1978) a seguir indicados:

1. Extensão máxima de tracção das camadas betuminosas;

$$\varepsilon_t = k \times 10^{-3} \times N_{AEP}^{-0,20}$$

Equação 3

ε_t – extensão máxima da tracção admissível;

K – factor que apresenta valores variando entre 2,6 e 2,8 para os macadames betuminosos, e entre 3,2 e 3,8 para os betões betuminosos, calculado de acordo com a Equação 4;

N_{AEP} – número admissível de eixos padrão.

$$k = 10^3 \times (0,856 \times V_b + 1,08) \times (10^6 \times E)^{-0,36}$$

Equação 4

V_b – percentagem volumétrica de betume (%);

E – módulo de deformabilidade da mistura betuminosa (Mpa).

2. Extensão máxima vertical de compressão da fundação;

$$\varepsilon_f = 1,8 \times 10^{-2} \times N_{AEP}^{-0,20}$$

Equação 5

ε_f – extensão máxima vertical de compressão admissível no topo da fundação, considerando o percentil 85%

- **Materiais a empregar na camada de reforço**

Segundo Jacinto¹⁴, a definição das características mecânicas (E, ν) é feita tendo em atenção os seguintes parâmetros:

¹³ [Azevedo, 2001]

¹⁴ [Jacinto, 2003]

1. E – Módulo de deformabilidade

- Condições climáticas, definido para a zona que se desenvolve o estudo, a temperatura ponderada do ar;
- Frequência de aplicação das cargas, sendo normalmente utilizado o valor de 10 Hz, e admitindo-se a adoção de frequências na ordem dos 5 Hz, quando se trate de traçados com velocidade de circulação reduzida;
- Tipo de betume a utilizar e suas características, definindo o seu índice de penetração;
- Composição volumétrica da mistura, definindo nomeadamente a percentagem de betume, a porosidade e a granulometria dos agregados, com destaque, no que se refere a esta, para o valor de passados no peneiro ASTM n.º 200 (0,074 mm);

2. v – Coeficiente de Poisson

- Este coeficiente, não tem grande influência nos cálculos estruturais.

• **Camadas betuminosas do pavimento existente**

Para realizar um dimensionamento do reforço do pavimento tem que se ter em conta a estrutura existente que se pretende reforçar.

No caso do pavimento existente apresentar um grau de fendilhamento reduzido, pode admitir-se que a sua capacidade de carga pela acção do tráfego ainda não foi esgotada, assim para cálculo da vida restante tem-se a Equação 6.

$$N_f = N_{ae} - N_p \quad \text{ou} \quad f = 1 - p$$

Equação 6

N_f – vida restante

N_{ae} – número admissível de passagens do eixo padrão, calculado para a estrutura do eixo padrão calculado para a estrutura do pavimento existente

N_p – número equivalente de passagens do eixo padrão correspondente ao tráfego futuro

f – vida restante

p – grau de consumo

$$f = \frac{N_f}{N_{ae}} \quad \text{e} \quad p = \frac{N_p}{N_{ae}}$$

Equação 7

Relativamente às camadas existentes, deve ter em consideração as seguintes condições [Azevedo, 2001]:

1. Se o pavimento não estiver fendilhado ou exibir um baixo grau de fendilhamento, é de admitir que as camadas betuminosas existentes tenham alguma vida residual e possam contribuir para a vida futura do pavimento:

$$\frac{N_{AEP}}{N_{ar}} < f$$

Equação 8

N_{ar} – número admissível de passagens do eixo padrão, calculado para a estrutura do pavimento com reforço;

N_{AEP} – número admissível de eixos padrão;

f – vida restante

2. Se o pavimento tem um fendilhamento importante (classe de fendilhamento), admite-se que já não tem vida restante, pelo que as camadas betuminosas são consideradas com módulos de deformabilidade da ordem de grandeza das camadas granulares.

2.8 Conclusão

Ao longo dos tempos, as estradas têm contribuído para o desenvolvimento cultural, social e económico de qualquer sociedade. Para que esse desenvolvimento perdure, torna-se essencial a existência de uma rede viária bem estruturada e com condições que permitam uma circulação eficaz com segurança.

Para se obter um funcionamento eficaz de uma rede viária é necessário que após a construção de uma estrada, se realize um acompanhamento periódico, para permitir que os utentes circulem com um nível de serviço aceitável. Esse nível de serviço, nem sempre é conseguido devido às estradas estarem sujeitas às mais diversas solicitações.

A acção contínua de várias solicitações sobre os pavimentos, com o passar do tempo, contribui para o aparecimento de várias patologias. Para identificar as patologias e para ter conhecimento do seu desenvolvimento, torna-se imprescindível realizar campanhas de análise contínuas.

As análises podem ser realizadas com equipamentos apropriados ou mediante observações visuais. A informação obtida é muito útil, na medida em que serve de apoio à decisão do melhor método de reabilitação a adoptar.

Quando a informação obtida indica que o pavimento apresenta uma capacidade de reforço reduzida, recorre-se a métodos de dimensionamento de reforço, tendo em conta vários parâmetros, como o clima, os materiais a aplicar e o tráfego.

Quando o pavimento não apresenta problemas estruturais, a reabilitação assenta apenas no melhoramento das características superficiais.

Capítulo 3

MÉTODOS DE REABILITAÇÃO DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS

3.1 Introdução

A reabilitação de um pavimento tem por objectivo melhorar um serviço aos utentes, aumentando as condições de segurança e conforto, sem perder de vista os factores económicos, durante o seu período de vida [Azevedo, 2001].

Reabilitar um pavimento é diferente de conservá-lo, a conservação baseia-se na manutenção da estrada (manter o estado actual), ao passo que a reabilitação tem como objectivo conferir-lhe as características iniciais (recuperar o estado inicial) [Azevedo, 2001].

Os pavimentos ao estarem sujeitos às mais diversas acções e solicitações, e com o passar do tempo, vão perdendo qualidades superficiais, como a perda da textura, da aderência, da regularidade, das características reflectoras e até mesmo características associadas à diminuição de ruído. A perda dessas características torna a condução bastante incómoda, justificando assim a reabilitação do pavimento.

A reabilitação das características superficiais ou funcionais implica uma melhoria do comportamento estrutural do pavimento. O inverso também é verdadeiro, ao corrigir as deficiências estruturais com a colocação de novas camadas, as características superficiais são consequentemente reabilitadas.

A reabilitação das características estruturais consiste, sobretudo, em prover a estrutura do pavimento de capacidade resistente, considerando um dado período de vida e diversas condições de solicitação.

Contudo, a reabilitação também é realizada de modo a dotar os pavimentos de características que deveriam apresentar desde o início, e que, devido a erros ou omissões de projecto ou de construção, ou até mesmo devido a tecnologias recentes não disponíveis aquando a execução, não apresentam.

Torna-se bastante importante distinguir a reabilitação das características superficiais das estruturais, pois a medida mais adequada a cada caso requer um diagnóstico prévio das causas das degradações actuais ou previsíveis e o conhecimento da estrutura do pavimento existente como das características dos seus materiais, do tráfego, do clima e de outros parâmetros da estrada, além dos diferentes procedimentos de reabilitação disponíveis [Azevedo, 2001].

3.2 Razões que Justificam um Projecto de Reabilitação de Pavimentos

Como já foi referido anteriormente nesta dissertação, a reabilitação depende de muitos factores, logo torna-se essencial obter um conhecimento de cada técnica de conservação e do comportamento sob a acção das solicitações.

Todavia, é inevitável, identificar os problemas do pavimento que justificam a reabilitação e não meras medidas de conservação correntes. Assim, as medidas de reabilitação tornam-se necessárias nos seguintes casos [Azevedo, 2001]:

1. Existência de degradações inaceitáveis da estrutura dos pavimentos;
2. Capacidade de carga insuficiente;
3. Custos excessivos das medidas de conservação corrente;
4. Nível de segurança insuficiente;
5. Grau de comodidade inaceitável sentido pelo utente;
6. Nível de custos inaceitáveis para o utente.

Porém, apenas os três primeiros casos referidos anteriormente, é que apontam directamente para uma reabilitação estrutural do pavimento.

3.3 Metodologia de um Estudo de Reabilitação

Existe uma série de procedimentos a executar durante um estudo de reabilitação, para que a intervenção a realizar seja a mais adequada.

Um estudo de reabilitação envolve os seguintes passos:

3.3.1 Recolha de informação disponível

Trata-se de uma etapa em que se deve pesquisar e recolher o maior número de dados relativos ao pavimento que se pretende reabilitar.

Esses dados podem-se distinguir da seguinte forma [Azevedo, 2001]:

- **Dados relativos ao pavimento**

1. Tipo e estrutura do pavimento da faixa de rodagem e bermas;
2. Características iniciais dos materiais;
3. Natureza do solo de fundação;
4. Data de entrada em serviço;
5. Tipo e data de realização das diferentes actuações de conservação ou de reabilitação que tenham sido realizadas desde a sua construção;
6. Outros dados de que se disponha (inspecção visual, auscultação anteriormente realizada, etc.).

- **Solicitações e envolventes**

1. Tráfego, fundamentalmente o tráfego pesado;
2. Condições atmosféricas da zona;
3. Drenagem.

A obtenção de todos estes dados é na maior parte dos casos difícil de adquirir, principalmente quando se trata de pavimentos antigos, em que a estrutura se torna bastante complicada de caracterizar. Existe uma enorme dificuldade de se encontrar uma estrutura homogénea, tanto a nível longitudinal como transversal. Esta situação deve-se a muitos factores tais como a construção de estradas em vários lanços, utilizando-se por vezes materiais diferentes; a construção de troços de estrada em tempos distintos; a realização de conservações em pontos localizados; a realização de uma reabilitação anterior; a execução de alargamentos, etc.. Assim, os dados só se conseguem obter, consultando projectos, que muitas vezes com a passar do tempo desaparecem e consultando várias pessoas envolvidas na construção ou em reparações, que na maioria, não se conseguem localizar, ou quando se localizam não se recordam dos trabalhos executados ou se recordam, fica no ar a fiabilidade das suas memórias.

Se se dispõe de dados de reconhecimento anteriores efectuados mediante sondagens relativamente à variabilidade habitual das espessuras das diferentes camadas que constituem o pavimento, mesmo que estes sejam escassos são importantes para se conhecer a natureza dos materiais dessas camadas, conhecimento importantíssimo para a interpretação dos ensaios de carga, caso tenham sido efectuados [Azevedo, 2001].

Todas as obras realizadas com o intuito de conservar ou reforçar devem ser conhecidas, assim como a data da realização destas. Também a data de execução do pavimento deve ser conhecida.

As datas de execução e intervenção dos pavimentos são essenciais para se poder decifrar a origem de muitas patologias existentes.

A periodicidade e o tipo de trabalhos relativos à conservação e até mesmo relativos à reabilitação dos pavimentos também indicam o tipo de degradação presente.

Esta recolha de dados é facilitada, se existirem bases de dados estruturadas e actualizadas.

A análise da informação permitirá fazer um primeiro zonamento, antes da recolha de dados durante as operações de auscultação do pavimento, atendendo aos seguintes critérios [Azevedo, 2001]:

1. Variação das condições climáticas, que podem influenciar o valor da temperatura do pavimento e o grau de humidade do solo de fundação;
2. Variações importantes do tipo de solo de fundação;
3. Variações significativas da secção transversal (aterro, escavação ou de nível);
4. Variações importantes do tipo de espessura das camadas existentes;
5. Variação do estado superficial do pavimento;
6. Variação das condições de drenagem;

7. Tipos de actuação previstas (tais como variantes, alargamentos, correcções de traçado, etc.).

3.3.2 Caracterização da situação existente

O principal objectivo da caracterização da situação existente baseia-se fundamentalmente na realização de um diagnóstico para que posteriormente se possa apurar e projectar a medida de reabilitação mais apropriada para vários intervalos homogéneos que possam existir no troço de estrada em estudo.

Um estudo de caracterização da situação existente engloba o levantamento detalhado da drenagem, do equipamento de sinalização e segurança e fundamentalmente do pavimento.

O estudo do pavimento existente não se baseia apenas numa observação ligeira. A observação deve ser muito pormenorizada, para que se detecte todas as anomalias. Assim, a inspecção deve ser efectuada a pé ou num veículo a circular em marcha muito lenta e até mesmo parar para observar situações mais flagrantes.

As condições climáticas têm muita influência na inspecção visual, logo devem ser realizadas em certas épocas do ano conforme a zona em estudo. Com o tempo de chuva, consegue-se descobrir se a drenagem apresenta alguma disfuncionalidade que prejudique o pavimento.

De salientar, que a inspecção dos pavimentos influencia a escolha da reabilitação mais indicada. A sua importância torna-se cada vez mais notória, pois os métodos de gestão de pavimentos baseiam-se sobretudo em sistemas mais ou menos automatizados de tratamento de dados obtidos visualmente.

Na maioria dos casos, recorre-se a trabalhos de campo, utilizando equipamentos de medida que fornecem dados sobre as características funcionais ou superficiais e sobre a capacidade de carga do pavimento, complementando assim a inspecção visual [Azevedo, 2001].

Efectuar a caracterização da capacidade estrutural só se justifica em projectos de reabilitação estrutural.

Além da informação recolhida e dos resultados dos equipamentos de medida, devem-se efectuar mais estudos de modo a complementar os anteriores. Deve-se realizar sondagens para recolher amostras para posteriormente se proceder a ensaios laboratoriais. Com essas amostras, pode-se ter conhecimento mais profundo do pavimento. Pode-se obter informação acerca das espessuras das camadas, dos materiais constituintes das camadas e do solo de fundação, assim como o seu estado, a aderência entre as camadas e conhecer a origem e extensão das patologias que afloram à superfície.

3.3.3 Diagnóstico do estado do pavimento

Para se realizar um diagnóstico, todos os dados recolhidos deve ser agrupados num gráfico. Nele pode-se observar no eixo das abcissas, as distâncias, e nas ordenadas, a informação recolhida, como a largura da faixa de rodagem e das respectivas bermas, dados acerca da fundação, a drenagem existente, características do pavimento, resultados das sondagens, das inspecções visuais e dos ensaios das características superficiais, dados referentes à geologia e geotecnia, categoria do tráfego, especificações do tipo de conservações e reabilitações executadas como as respectivas datas, etc..

Com o referido gráfico, a estrada em estudo divide-se em vários trechos que apresentem alguma homogeneidade. Dentro desses trechos identificam-se zonas pontuais que requerem medidas de reabilitação especiais.

3.3.4 Análise de Soluções

A análise de soluções passa sobretudo pelo estudo profundo da situação existente. É necessário ponderar sobre todos os dados recolhidos, para que a solução seja a mais adequada para resolução dos problemas encontrados.

Mediante as patologias encontradas, a reabilitação pode basear-se apenas no melhoramento das características superficiais ou pode existir a necessidade de recorrer ao reforço do pavimento, quando a capacidade estrutural não se comprova.

Embora a técnica utilizada com mais frequência na reabilitação de pavimentos flexíveis seja a execução de reforços com misturas betuminosas convencionais, diversos factores, como sejam os aspectos económicos, as crescentes exigências de qualidade e as cada vez maiores preocupações ambientais, têm conduzido ao aparecimento de novas técnicas de reabilitação de pavimentos rodoviários, que poderão em alguns casos constituir alternativas interessantes às técnicas convencionais. Torna-se indispensável, conhecer em cada caso, quais as técnicas inovadoras, passíveis de serem utilizadas, bem como as respectivas vantagens e desvantagens, de forma a otimizar-se a escolha da solução a implementar.

A escolha do tipo de soluções de reabilitação depende muitas vezes de limitações económicas. Por vezes opta-se por investir por etapas, realizando reforços do pavimento por fases. Recorre-se a este tipo de investimento devido a insuficiência de recursos no momento. É de todo importante, efectuar estudos económicos antes de definir a solução.

3.4 Técnicas de Reabilitação

A reabilitação de um pavimento procura melhorar as características superficiais e estruturais, para fazer face a novas solicitações, naturalmente mais severas no que se refere ao volume de tráfego considerado, para um novo período de vida.

3.4.1 Técnicas de Reabilitação das Características Superficiais

Como já foi referido anteriormente, a comodidade e segurança da condução numa estrada dependem em larga medida de boas características superficiais. Quando essas são diminutas, existe uma série de técnicas que permitem corrigi-las.

As técnicas de reabilitação superficial actuam apenas ao nível da camada de desgaste e só se devem aplicar quando os pavimentos em causa não apresentam problemas estruturais. Recorre-se a este tipo de reabilitação com mais frequência nos casos em que é necessário melhorar as características anti-derrapantes dos pavimentos em cuja superfície é visível a exsudação do betume, em superfícies polidas, em locais específicos como rampas, curvas, etc., em locais críticos onde a visibilidade é reduzida devido à projecção de água ou reflexão de luz.

No melhoramento das características superficiais, as camadas geralmente aplicadas apresentam custos de produção baixos, rendimentos de trabalho diário elevados e em zonas urbanas a sua aplicação geralmente não causa grandes transtornos.

Na maioria das técnicas de reabilitação pode-se recorrer ao betume modificado com borracha, de modo a melhorar as características mecânicas do pavimento.

De seguida apresentam-se várias técnicas que se destacam no melhoramento das características da camada superficial.

3.4.1.1 Revestimentos Superficiais Betuminosos

Os tratamentos superficiais são revestimentos obtidos por aplicação separada e sequencial de ligante betuminoso e agregado mineral de granulometria previamente especificada, constituindo assim uma camada de desgaste delgada sobre o pavimento existente. Esta técnica permite sobretudo reabilitar as características superficiais, contudo, conseqüentemente as características estruturais também são reabilitadas.

A colocação de revestimentos superficiais permite atribuir ao pavimento uma superfície desempenada, impermeável e com uma certa rugosidade e textura, eliminando os problemas de atrito e projecção de água, permitindo assim, que os condutores circulem com comodidade e segurança.

O emprego dessa camada de espessura reduzida, protege as camadas inferiores, da ocorrência de infiltração de águas, conseguindo-se assim uma melhor capacidade de suporte.

Segundo a Macropavi¹⁵, descrevem-se os objectivos dos revestimentos superficiais. De um modo resumido são:

1. Proporcionar uma camada de rolamento de pequena espessura, porém de alta resistência contra o desgaste;
2. Impermeabilizar o pavimento;
3. Proteger a infra-estrutura do pavimento;
4. Proporcionar um revestimento anti-derrapante;
5. Proporcionar um revestimento com grande flexibilidade que possa acompanhar deformações relativamente grandes da infra-estrutura;
6. Rejuvenescimento de pavimentos betuminosos envelhecidos.

De salientar, que se trata de uma técnica que deve ser aplicada apenas quando o pavimento apresenta uma boa capacidade estrutural e poucas deformações.

Presentemente, devido às inovações dos ligantes, os revestimentos já podem ser executados em pavimentos com elevadas taxas de tráfego, de diversas intensidades e velocidades.

Existem diversos tipos de tratamentos superficiais, que dependem de factores como as características do pavimento, volume e tipo de tráfego e até mesmo das condições climáticas do local.

¹⁵ [Macropavi, 2005]

De seguida, apresentam-se e descrevem-se os vários tipos de revestimentos superficiais e a sua aplicação a casos distintos.

- **Revestimento simples (LA)**

Camada de revestimento do pavimento constituída pela aplicação de ligante betuminoso coberto por uma camada de agregado granular com dimensões pequenas.

Este tipo de revestimento deve ser aplicado quando o pavimento existente não apresenta grandes irregularidades e/ou deformações.

Trata-se de uma técnica que apresenta custos de aplicação reduzidos em comparação com outro tipo de revestimentos superficiais.

Como estes revestimentos não apresentam grande resistência a esforços tangenciais elevados é conveniente aplicá-los em estradas que apresentem um TMDA até 300 veículos.

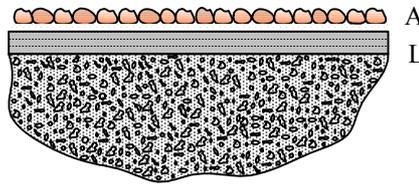


Figura 3.1 – Revestimento betuminoso simples (LA)¹⁶

- **Revestimento simples com dupla aplicação de agregado (LAa)**

Técnica de revestimento adequada para se executar em pavimentos que apresentem tráfegos bastante elevados e rápidos, ou quando as patologias observadas apresentam grandes extensões.

Facultam um escoamento rápido das águas superficiais e atribuem ao pavimento boas características de rolamento.

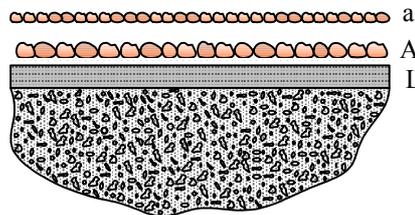


Figura 3.2 – Revestimento betuminoso simples com dupla aplicação de agregado (LAa)¹⁷

- **Revestimento simples com aplicação prévia de agregado (ALa)**

Estes revestimentos não são dos mais escolhidos para reabilitação dos pavimentos. No entanto, este tipo deve ser adaptado a pavimentos a suportes heterogêneos e com exsudação.

¹⁶ Adaptado de [Pereira e Miranda, 1999]

¹⁷ Adaptado de [Pereira e Miranda, 1999]

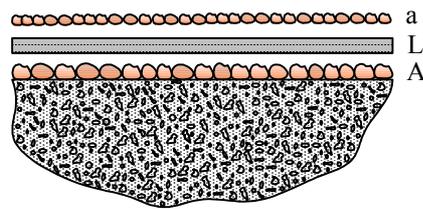


Figura 3.3 – Revestimento betuminoso simples com aplicação prévia de agregado (ALa)¹⁸

- **Revestimento duplo (LALa)**

Camada de Revestimento do Pavimento constituída por duas aplicações sucessivas de ligante betuminoso cobertas cada uma por camada de agregado granular.

Estes revestimentos devem apresentar granulometrias descontínuas tendo em vista atingir dois objectivos: melhorar a rugosidade e permitir que os agregados se encaixem com mais facilidade. Também se trata de uma técnica de revestimento adequada para se executar em pavimentos que apresentem tráfegos bastante elevados e rápidos

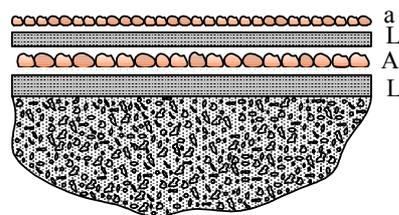


Figura 3.4 – Revestimento betuminoso duplo (LALa)¹⁹

- **Revestimento duplo com aplicação prévia de agregados (ALALa)**

Camada de pavimento constituída por duas aplicações sucessivas de ligante betuminoso cobertas cada uma por camada de agregado granular.

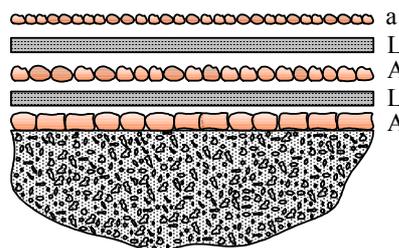


Figura 3.5 – Revestimento betuminoso duplo com aplicação prévia de agregado (ALALa)²⁰

¹⁸ Adaptado de [Pereira e Miranda, 1999]

¹⁹ Adaptado de [Pereira e Miranda, 1999]

²⁰ Adaptado de [Pereira e Miranda, 1999]

- **Revestimento triplo (LALALa)**

Este tipo de revestimento deve ser adaptado a pavimentos com suportes muito heterogêneos. É uma estrutura que tem pouca aplicação por apresentar custos de aplicação muito elevados.

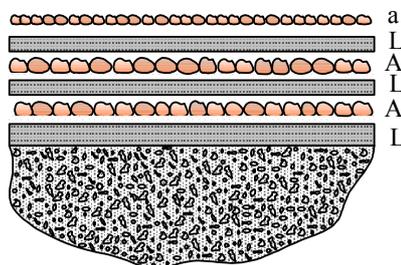


Figura 3.6 – Revestimento triplo (LALALa)²¹

Os revestimentos em multi-camadas são mais duráveis e eficazes, no entanto, ostentam maiores custos.

Podem-se destacar algumas vantagens na aplicação de revestimentos superficiais:

1. Simplicidade e segurança no *stock*, no transporte e na aplicação;
2. Possibilidade de trabalhar com temperaturas ambientes baixas;
3. Menor susceptibilidade térmica;
4. Grande poder do ligante penetrar e envolver os agregados;
5. Possibilidade de aplicação uniforme de pequenas percentagens de ligante;
6. Não emitem vapores ou gases durante a aplicação, que prejudiquem a saúde;
7. Na aplicação não existe o perigo de um sobreaquecimento do ligante que posteriormente resulte no seu envelhecimento precoce;
8. O seu manuseamento e aplicação consomem uma quantidade de energia mais diminuta em relação aos métodos tradicionais.

A vida útil de um tratamento superficial depende muito da qualidade dos agregados e do ligante. Deve existir uma coesão entre esses dois constituintes, de modo a não ocorrerem desagregações precoces.

A maior parcela constituinte dos revestimentos superficiais é de agregados. Os agregados devem ser de boa qualidade e apresentarem uma alta resistência mecânica, devem ainda ter dimensões muito homogêneas, com a forma mais cúbica possível, para aumentar a rugosidade ao pavimento e devem ser destituídos de substâncias nocivas ou lixos que dificultem a aderência ao ligante.

Os agregados a escolher vão depender de vários factores, nomeadamente [Pereira e Miranda, 1999]:

1. O tipo de estrutura do pavimento;
2. Do tráfego;

²¹ Adaptado de [Pereira e Miranda, 1999]

3. Das características do pavimento;
4. Da rugosidade a obter;
5. Da diminuição do ruído;
6. Da melhoria da aderência;
7. Da obtenção de drenagem superficial, além da impermeabilização.

Conforme o tipo de revestimento escolhido, a granulometria pode apresentar-se mais ou menos homogénea. No caso de se pretender diminuir o ruído, a granulometria deve ser contínua, no caso de se pretender melhorar a aderência e a drenagem superficial, os agregados devem ter dimensões maiores. A opção de se utilizar agregados de maior dimensão também deve ser tida em conta nas situações do suporte ser muito heterogéneo e quando o tráfego é muito elevado.

Quanto aos ligantes, utiliza-se o betume puro, do tipo 180/200, que é aquecido a uma temperatura de 160 °C, as emulsões betuminosas que são geralmente catiónicas de rotura rápida, para permitir a abertura ao tráfego com rapidez. Também é muito frequente recorrer a betumes e emulsões modificadas, que beneficiam a adesividade, melhorando as características do revestimento. A sua utilização também aumenta a resistência ao tráfego.

A adesividade é fundamental para o sucesso futuro da camada, tanto entre o revestimento e o suporte como no envolvimento dos agregados, assim, deve-se procurar aumentá-la do seguinte modo [Pereira e Miranda, 1999]:

1. Incorporando aditivos no ligante (dopagem);
2. Limpando e secando a quente os agregados;
3. Aplicando aditivos entre os agregados e o ligante;
4. Fazendo o pré-envolvimento dos agregados com emulsão.

Há uns anos atrás havia a necessidade de se proceder à escolha do ligante, de acordo com as condições existentes e o objectivo de funcionamento do revestimento, pois se por um lado as emulsões permitiam a execução de revestimentos com bons resultados sob condições atmosféricas desfavoráveis, por outro os betumes puros proviam uma estabilização mais rápida do revestimento. Com o aparecimento das emulsões de betume modificado este quadro alterou-se, uma vez que as limitações, que as emulsões tradicionais apresentavam, foram praticamente eliminadas pelas quantidades e características destas emulsões [Roma, 2005]. Mesmo assim a aplicação do revestimento superficial só oferece eficácia se se seguir uma série de procedimentos durante a sua aplicação.

Inicialmente, é efectuada uma limpeza do pavimento existente para eliminar todas as partículas de pó, que podem colocar em causa a adesividade entre esse pavimento e a futura camada de revestimento. Existe equipamento apropriado para a realização deste tipo de trabalhos, como as varredoras com escovas rotativas. A aplicação do ligante e dos agregados é o próximo passo. O ligante tem que ser aplicado de uma só vez, segundo a dosagem especificada. Para executar esta tarefa, recorre-se a cisternas. Os excedentes do ligante deverão ser imediatamente eliminados. O material betuminoso não deverá ser aplicado em superfícies molhadas, com excepção das emulsões, desde que não exista excesso de água na superfície. Imediatamente após aplicação do ligante, terá que ser espalhado o

agregado, na quantidade discriminada no projecto. Essa aplicação é realizada recorrendo a gravilhadoras. Em casos de excesso de agregado, esse deve ser removido antes da compactação.

A tarefa seguinte consiste na compactação da camada, utilizando cilindros de pneus, para permitir uma conexão uniforme entre os agregados e o ligante. A compactação também permite que exista uma correcta junção entre o revestimento e o pavimento antigo. Após a compactação, ter-se-á que varrer levemente o revestimento superficial. Este tipo de trabalho justifica-se devido a gravilhas soltas, que após a abertura da estrada ao tráfego, podiam ser projectadas originando acidentes.

Caso se trate de tratamentos duplos ou triplos, a segunda e a terceira camadas são executadas de modo idêntico à primeira.

A aplicação do ligante e dos agregados é realizada conforme o tipo de revestimento que se está a executar.

Importa, ainda observar, na execução dos revestimentos todas as acções que directa ou indirectamente influem na sua perfeição, quer funcional quer estética. Assim, deve ser observada uma especial atenção à execução de juntas transversais e longitudinais de forma a não introduzirem no pavimento pequenos ressaltos que se reflectem na incomodidade e insegurança automóvel. Outro dos pontos negros das camadas de desgaste executadas em revestimentos é o aspecto inacabado que apresentam, bem como o aspecto anti-estético das juntas de trabalho, mesmo que bem executadas. No sentido de anular este inconveniente estético, aplica-se uma rega de acabamento ou impermeabilização com uma emulsão catiónica, de rotura rápida, baixa concentração em betume residual e baixa viscosidade, que contribui também para a impermeabilização da camada bem como para a fixação das gravilhas que não foram rejeitadas [Roma, 2005].

A execução de revestimentos superficiais apresenta muitas vantagens, como a rapidez de execução, o baixo custo, a óptima aderência entre pneu/pavimento, durabilidade, flexibilidade (resiste a grandes deformações) e boa impermeabilização. No entanto, existem desvantagens, que surgem devido ao melhoramento da aderência, como o ruído, o desgaste dos pneus e o maior consumo de combustível.

As características dos revestimentos superficiais mantêm-se estáveis ao longo da vida do pavimento, sendo que no caso em que o anterior pavimento de suporte esteja em condições e haja uma boa gestão da conservação do novo revestimento, este pode ter um período de vida relativamente elevado (até 7 anos) [Pereira e Miranda, 1999]. Mas o período de vida depende ainda de outros efeitos conjugados do tráfego e dos agentes atmosféricos (água, amplitudes térmicas, radiações, etc.). Por isso a sua eficácia vai depender, em primeiro lugar, da adequabilidade da solução adoptada, em segundo das características e propriedades dos materiais seleccionados e por último dos meios utilizados na execução [Roma, 2005].

Actualmente, os revestimentos superficiais oferecem a melhor relação custo/benefício, quando se trata em reabilitar as características funcionais.

3.4.1.2 Microaglomerado Betuminoso a Frio

Trata-se de uma camada ultra-delgada (com cerca de um centímetro), a qual não traduz nenhum melhoramento da capacidade estrutural, mas beneficia o pavimento quanto a características superficiais e prolonga o seu período de vida.

Os microaglomerados betuminosos a frio resultam de uma emulsão betuminosa especial (catiônica, de rotura controlada e modificada com elastómeros), agregados de granulometria bem graduada (criteriosamente seleccionados), água, filer comercial e eventualmente aditivos. Estes componentes dão origem a uma mistura fluída, homogénea e de aspecto cremoso, que após a evaporação da água, constitui uma mistura estanque, densa e rugosa [Pavia, 2005].

Os trabalhos de mistura e espalhamento do microaglomerado são realizados mediante equipamento apropriado. A execução deste tipo de camada é bastante rápida devido à sua reduzida espessura. No entanto, existe ainda um outro factor que contribui para a rapidez da colocação da camada, esse traduz-se na exclusão de trabalhos de compactação.

Trata-se de um revestimento bastante eficaz no que se refere ao melhoramento das características superficiais, como a rugosidade e a impermeabilização.

A formulação do microaglomerado depende da finalidade da aplicação. Conforme a rugosidade pretendida, a granulometria terá que ser diferente.

A emulsão deverá ser catiônica de rotura rápida. Através da incorporação de fibras ou polímeros, obtêm-se emulsões modificadas que têm a vantagem de reduzir a susceptibilidade térmica da mistura, de melhorar a adesividade dos agregados e a resistência ao desgaste e de diminuir a sensibilidade à água, além de melhorar a resistência à deformabilidade e a resistência à fadiga da mistura [Pereira e Miranda, 1999].

A aplicação deste tipo de revestimentos em zonas urbanas é muito vantajosa, uma vez que apresenta espessuras muito reduzidas, permitindo assim, respeitar as cotas de soleiras existentes e diminuir o ruído propagado pelo tráfego.

É usual utilizar o microaglomerado em selagem de fendas e em reparações pontuais, sempre que nesses locais se observem desagregações.

Estes revestimentos podem ser aplicados numa camada simples ou em duplas camadas. Quando se opta por revestimentos microaglomerados duplos, pretende-se aumentar a capacidade de suporte, a macrotextura e a impermeabilização.

O sucesso da sua colocação deriva dos procedimentos efectuados e dos materiais e equipamentos utilizados. Os materiais empregados (água, agregados, emulsão e aditivos) devem estar bem compartimentados. Actualmente, existem máquinas que recebem e distribuem continuamente os agregados, aumentando a eficácia e o rendimento.

A mistura deve ser espalhada homogeneamente sobre o pavimento existente, que deve ser molhado previamente caso o tempo se apresente muito seco.

Esta técnica a frio diminui os custos energéticos e apresenta custos satisfatórios uma vez que atribui ao pavimento boas características superficiais.

3.4.1.3 Lama Asfáltica / Slurry Seal

Este revestimento consiste numa mistura com a consistência de uma lama com agregados menores (cerca de 2 mm) que os utilizados na técnica do microaglomerado a frio e emulsão.

O seu espalhamento é feito a frio e o seu fabrico é realizado através de um camião-betoneira ou de um camião provido de equipamentos próprios para esta finalidade. Estes camiões permitem um fabrico contínuo da mistura e do seu espalhamento. São equipamentos providos de silos para os agregados, misturador contínuo, tanques para armazenamento da emulsão e da água e um sistema de doseadores.

A sua aplicação é realizada com as seguintes finalidades: rejuvenescer a superfície envelhecida, selagem de fissuras, corrigir pequenas desagregações do pavimento e evitar a penetração da água.

A emulsão utilizada, de rotura catiónica, é o ligante utilizado e deve proporcionar trabalhabilidade à mistura, deve-se adaptar às condições climáticas (chuva e humidade) e ao tráfego e deve possibilitar o emprego de agregados de natureza básica, ácida ou mista. A velocidade de rotura da emulsão deve ser regulada em função dos agregados, do tipo de serviço e do equipamento utilizado. No caso de selagem de fissuras, a rotura deve ser a mais lenta possível, de modo a permitir que a lama penetre.

Os agregados normalmente empregues são materiais finos, como o filer ou o pó obtidos da britagem de rocha sã. Quando o pó de pedra contém um filer, corrige-se a granulometria com a adição de areia [Petrobras, 2005].

A aplicação é efectuada recorrendo a camiões capazes de se deslocam a velocidades reduzidas, de uma forma contínua, sem arranques nem paragens bruscas, de modo a garantir um trabalho uniforme e exemplar. Os camiões devem estar munidos de silos para agregados, com as granulometrias correctas conforme o projecto, depósito para filer (com doseador), depósito de água, tanques para armazenamento da emulsão e misturador apropriado. É de salientar, que os trabalhos só devem ser executados nas condições ambientais apropriadas.

Esta técnica apresenta um grande benefício que se traduz na rapidez de execução. Em contrapartida, trata-se de uma técnica que apresenta uma baixa e micro rugosidade, diminuindo a aderência, principalmente quando o pavimento se encontra molhado.

Não obstante, esta técnica é ainda utilizada em Portugal em operações de reabilitação para protelar intervenções de fundo, sendo utilizada com mais frequência como tratamento prévio de pavimentos fendilhados e, em regra, antecede a realização de uma interface “anti-fendilhamento” [Pereira e Miranda, 1999].

3.4.1.4 Argamassa Betuminosa

A argamassa betuminosa, tal como as técnicas anteriormente referidas, conduz a um melhoramento mínimo das características da camada de desgaste do pavimento a reabilitar.

Nas situações de fendilhamento generalizado, e perante a necessidade de retardar uma reabilitação estrutural, poderá ser uma alternativa de curto prazo, dado que apresenta uma boa capacidade de se adaptar a deformabilidades acentuadas [Pereira e Miranda, 1999].

Trata-se de uma técnica que recorre ao betume puro ou modificado, logo pertence à família das misturas betuminosas a quente.

Recorre-se a este tipo de revestimento, quando o tráfego apresenta valores baixos e pouco severos.

3.4.1.5 Betão Betuminoso

A colocação de camadas de desgaste em betão betuminoso é muito usual em Portugal. Embora existam variadas técnicas inovadoras, o betão betuminoso continua a ser usado extensivamente na construção e na reabilitação de pavimentos.

Normalmente este tipo de técnica executa-se recorrendo na maioria dos casos a uma camada de regularização subjacente ou sobre um suporte que apresente uma boa regularidade, com boas capacidades de suporte e que apresente pouco fendilhamento.

Os ligantes utilizados no betão betuminoso conferem adesão aos agregados e contêm propriedades que tornam a camada impermeável e resistente à circulação de veículos, especialmente os pesados. No entanto, as características do betão betuminoso podem ser adversamente afectadas se a formulação dos materiais for mal executada. Por exemplo, sob a influência da água, da temperatura excessiva e da radiação solar, os betumes utilizados na camada, podem sofrer lentamente degradações.

A adesividade do betume a uma superfície depende da natureza dessa mesma superfície e do estado do betume. A presença de água por vezes impede a adesão e as temperaturas da superfície do pavimento como dos agregados influenciam também a ligação. Caso a poeira existente na superfície do pavimento não seja retirada, quando sobre essa e sobre o pavimento é aplicada a rega de colagem, surge um problema de aglutinação das partículas de pó com a rega de colagem formando uma película que não permite uma correcta colagem entre as camadas. Consequentemente pode originar problemas como peladas, ou desagregação da camada de desgaste. Existe um elevado número de aditivos que permitem melhorar a adesão dos betumes aos agregados e à superfície do pavimento. Essas ligações são fundamentais para o desempenho satisfatório da camada.

As propriedades de resistência à penetração de água depende do grau de impermeabilidade e/ou absorção dos inertes constituintes da camada. Mesmo uma camada muito fina fornece uma barreira de água excelente.

Sob determinadas circunstâncias a água pode ser absorvida pelo próprio betume ou por quantidades minuciosas de sais ou de materiais inorgânicos. Todavia, a taxa de penetração da água no betume é muito baixa [IRC, 2005].

As propriedades viscosas dos betumes são da maior importância. A camada de betão betuminoso ao ser colocada deve seguir os critérios de temperatura definida no respectivo estudo. Caso o betume sofra sobreaquecimento, pode originar o envelhecimento prematuro, no entanto, quando o betume é aplicado a baixas temperaturas, a sua trabalhabilidade é reduzida e origina problemas na camada que resultam em futuros problemas dispensáveis. As condições de transporte e a colocação (não aplicar quando as temperaturas são muito baixas) do betão betuminoso são essenciais para se conseguir uma camada resistente a várias solicitações, conseguindo-se assim o retardar o aparecimento de diversas patologias.

As misturas betuminosas devem ser aplicadas através de pavimentadoras, com mesa vibradora, as quais devem permitir um espalhamento uniforme das misturas, sem a produção de segregação dos materiais constituintes. As mesas devem estar munidas de um sistema automático de nivelamento progressivo, constituído por sensores e por um pêndulo [Pereira e Miranda, 1999].

A regularidade da camada também é conseguida se a pavimentadora for continuamente alimentada, afastando baixas de temperatura (perda de trabalhabilidade da mistura betuminosa) e evitando juntas e defeitos em sítios pontuais.

No entanto, nem sempre é simples obter uma alimentação contínua e com qualidade. Para que tal suceda o transporte entre a central e o local da obra deve ser o mais curto possível, o transporte das misturas deve ser efectuado em condições especiais.

É de ressaltar, que antes de se aplicar a camada de betão betuminoso, deve ser empregue sobre o pavimento a reabilitar, uma rega de colagem. Torna-se muito importante esperar pela rotura dessa emulsão antes de aplicar o betão betuminoso, para o sucesso da execução da camada de desgaste.

As condições climatéricas favoráveis aquando a aplicação da camada em betão betuminoso são fundamentais, isto é, a temperatura ambiente deve ser superior a 10 °C e não é aconselhável realizar o espalhamento sob chuva ou ventos fortes (acima dos 30 km/h), especialmente o espalhamento da rega de colagem. Após a aplicação da camada segue-se imediatamente a compactação, com cilindros de rasto liso e/ou cilindros de pneus. Esse equipamento utiliza-se em separado ou em simultâneo, conforme a espessura das camadas.

A vantagem da utilização deste tipo de técnica é a obtenção de uma superfície com óptimas características de reabilitação no que diz respeito ao conforto (rugosidade e regularidade) e à segurança (aderência).

3.4.1.6 Microbetão Betuminoso Rugoso/Microbetões

O microbetão betuminoso rugoso é aplicado em espessuras reduzidas, sendo a sua aplicação ideal em áreas urbanas.

A mistura dos agregados é realizada a partir das fracções 0/2 e 6/10, resultando uma granulometria 0/10 com descontinuidade na fracção 2/6 [Pereira e Miranda, 1999]. Em geral utiliza-se ligantes modificados com polímeros, nomeadamente borracha reciclada de pneus.

A aplicação da camada passa primeiro pela limpeza do suporte e depois aplica-se a rega de colagem, que deve sofrer rotura antes da colocação da camada de microbetão betuminoso rugoso. A temperatura de fabrico ronda valores na ordem de 160 a 180 °C (mais 20 °C que as misturas betuminosas a quente tradicionais), devido ao ligante utilizado ser modificado com polímeros (elastómeros). Todavia, se o betume sofrer sobreaquecimento, ou seja, se o fabrico ultrapassar os 180 °C, pode originar o envelhecimento precoce devido à oxidação do betume e a degradação do polímero utilizado.

Os procedimentos de transporte e de aplicação da camada em microbetão betuminoso rugoso são os mesmos da aplicação da camada em betão betuminoso.

O interesse da colocação deste tipo de revestimento, baseia-se sobretudo em dotar o suporte existente com boas características superficiais. É uma técnica que pode ser utilizada para conservação de pavimentos sujeitos a tráfego muito intenso.

Normalmente este tipo de técnica utiliza-se recorrendo na maioria dos casos a uma camada de regularização ou a um suporte que apresente pouca irregularidade.

3.4.1.7 Betão Betuminoso Drenante

Trata-se de uma mistura betuminosa conseguida à custa de uma granulometria descontínua, com elevada porosidade, que baseia a sua estabilidade no atrito interno dos agregados grossos e a sua coesão no ligante especial, normalmente um betume polímero, o qual poderá ser o betume modificado com borracha de pneus reciclados, especificamente formulado.

Devido à percentagem elevada de vazios, toda a água que cai neste tipo de revestimento infiltra-se e depois circula nos referidos vazios, contribuindo para a segurança dos utentes da estrada, uma vez que reduz a projecção de água, a qual não se acumula na superfície, eliminando o fenómeno de hidroplanagem e consequentemente diminui as derrapagens.

O betão betuminoso drenante só deverá ser aplicado quando o suporte apresenta uma boa capacidade de suporte, boa regularidade e que seja impermeável. Contudo, deve-se evitar a sua aplicação em zonas que possam eventualmente estar sujeitas a águas estagnadas e de fácil colmatação (permite o ressurgimento da água à superfície). É devido a este problema que é fundamental existir uma conservação periódica adequada (aplicação de água em pressão seguida da respectiva aspiração). Assim, os custos de manutenção tornam-se mais significativos comparando com outro tipo de pavimentos que não impõem esse tipo de conservação mais exigente.

Os procedimentos do processo construtivo são semelhantes aos referidos para a execução do micro betão rugoso, isto porque, em ambos se utilizam ligantes com polímeros na sua constituição. Certas disposições construtivas são fundamentais para um bom funcionamento da camada. É necessária uma zona de transição entre a camada drenante e as camadas de desgaste densas dos pavimentos adjacentes, não devendo terminar a camada drenante numa zona de pendente longitudinal significativa. A camada drenante deve terminar 30 cm a 50 cm antes do limite do suporte para permitir o correcto escoamento da água, devendo haver uma transição a de 4 a 2 cm na espessura da camada antes da terminar.

A camada de betão betuminoso drenante permite a entrada e percolação da água, logo, não se trata de uma camada impermeável. Uma desvantagem da aplicação desta técnica é o recurso a uma camada subjacente, como a mistura betuminosa densa, que tenha na sua composição uma percentagem maior de ligante para atribuir à estrutura características impermeáveis. Todavia esta técnica apresenta boas características mecânicas, resistindo durante um bom período de tempo à degradação, assim, a sua aplicação é aconselhável em estradas de elevada intensidade de tráfego ou em vias urbanas periféricas.

O ruído provocado pela circulação dos veículos neste revestimento, é bastante reduzido, podendo ser executado em zonas urbanas, em zonas perto de hospitais ou escolas, ou seja, em zonas que exigem que a propagação do ruído seja diminuta.

Quando o seu período de vida atingir o limite, a sua reabilitação passa por se colocar uma nova camada de mistura betuminosa que apresente boas características impermeáveis, ou reciclar *in situ* ou em central, ou proceder à fresagem e colocação de uma nova camada drenante.

3.4.1.8 Ranhuragem do Pavimento

Recorre-se à ranhuragem do pavimento quando esse apresenta inclinações transversais nulas, impedindo um escoamento rápido das águas. A ranhuragem (*grooving*) e a aplicação de materiais, tais

como as gravilhas duras incrustadas pré-envolvidas em betume (*chipping*), os revestimentos superficiais, os betões betuminosos drenantes e as misturas betuminosas rugosas aplicadas em camadas delgadas ou ultra delgadas, para melhorar as características de rugosidade ou de aderência entre o pneu e o pavimento, principalmente em períodos de chuva [Azevedo, 2001].

3.4.1.9 Selagem de Fendas

A selagem de fendas de pequena gravidade, as quais não conduzem à necessidade de uma reabilitação estrutural, para impermeabilização do pavimento, impedindo a penetração de água e de elementos estranhos, contribuindo também para uma reabilitação estrutural ao impedirem ou atrasarem a progressão da degradação. Esta selagem é feita a partir da colocação de materiais betuminosos a frio, tais como microaglomerados e *slurries*, geotêxteis impregnados com betume e argamassas betuminosas a quente com betumes modificados. A escolha do material depende da gravidade observada e do nível de serviço da estrada [Azevedo, 2001].

3.4.1.10 Reparações Localizadas

Sempre que a estrada apresente um pavimento com um número de patologias reduzido e sempre que estas estejam presentes apenas em locais pontuais e isolados, recorre-se a este tipo de técnica. São exemplo desses casos pontuais, a desagregação da camada de desgaste ou abertura de valas para implantação de infra-estruturas de qualquer natureza, que ao serem rapidamente cobertas com material apropriado, melhora as características funcionais e estruturais.

No que se refere ao melhoramento das características superficiais, melhora a superfície evitando que ocorra projecção do material desagregado, quanto ao melhoramento das características estruturais, a reparação impede que a água se infiltre nas camadas subjacentes, defendendo assim a capacidade estrutural do pavimento. É de salientar, que as reparações, por mais bem executadas que estejam, são na maioria dos casos notórias, especialmente no que diz respeito a regularidade, existindo em muitos locais depressões ou elevações, contribuindo para um desconforto e insegurança da condução. As reparações, parecem simples de executar, porém, devem-se seguir certos procedimentos para não surgirem problemas como a falta de aderência entre a mistura betuminosa usada e o suporte, a deficiente drenagem superficial, a falta de compactação e o conseqüente desprendimento do material colocado. Antes de proceder à colocação do material para cobrir a zona a reabilitar, deve-se cortar na vertical toda a envolvente dessa mesma zona, de modo a extrair todo o material desagregado, seguidamente, limpa-se e seca-se a cavidade, depois aplica-se a rega de colagem e consecutivamente, enche-se com mistura betuminosa a quente ou a frio e por fim compacta-se e sela-se as faces para evitar a entrada de água.

3.4.2 Técnicas de Reabilitação das Características Estruturais

Geralmente, as técnicas de reabilitação estrutural passam pelo reforço do pavimento existente aplicando novas camadas de misturas betuminosas. O aumento de camadas permite aumentar a capacidade de suporte para fazer face aos aumentos de volumes de tráfego.

As medidas de reabilitação da estrutura de um dado pavimento são normalmente tidas como soluções a longo prazo. Em estradas, a vida útil considerada nos projectos de reabilitação de pavimentos situa-

se em geral entre os 10 e os 20 anos. Quando um pavimento necessita de intervenção a nível estrutural, normalmente é necessário recorrer à execução de vários trabalhos, que se denominam por trabalhos de reabilitação preparatórios. Esses trabalhos devem ser realizados para que nas camadas de reforço não se reflectam os problemas que se pretendem solucionar. Assim os trabalhos de reabilitação preparatórios mais utilizados são:

Trabalhos de Reabilitação Preparatórios	Anomalias que Justificam a Reabilitação Preparatória
Saneamentos Localizados	<ul style="list-style-type: none"> • Observação no pavimento de zonas pontuais com assentamentos acentuados; • Eventual degradação das camadas inferiores, por má execução das mesmas ou por insuficiente capacidade de carga da fundação ou drenagem insuficiente; • Levantamento localizado do pavimento, causado pelo crescimento de raízes de árvores.
<p>Nota: Quando os saneamentos são executados em locais onde se verifica que existe grande assentamento, remove-se a totalidade das camadas do pavimento e cerca de 20 a 30 cm do solo de fundação e recoloca-se novos materiais, incluindo os materiais granulares necessários.</p>	
Fresagens	<ul style="list-style-type: none"> • Quando a camada betuminosa se encontra em muito mau estado, do ponto de vista do fendilhamento; • Quando nas sondagens à rotação se verifica que as camadas se encontram desligadas.
<p>Nota: Nas zonas onde se recorreu à fresagem, para remoção da camada betuminosa em mau estado são preenchidas por igual mistura nova, geralmente densas e de granulometria da mistura de agregados consoante a mistura a colocar. Quando as carências estruturais são mais profundas e algum ou alguns dos materiais das camadas do pavimento já se encontram no final da sua vida útil, procede-se à sua eliminação, antes da aplicação de materiais novos, geralmente fresagem de todas as camadas degradadas e à sua substituição por camadas sãs. Procede-se assim à reconstrução, que pode ser parcial ou total do pavimento. O material fresado tem sido nos últimos tempos conduzido a vazadouros, mas, actualmente prevê-se, nos projectos de execução das beneficiações, a sua reutilização, designadamente nos aterros das variantes e mesmo nas misturas betuminosas de reforço.</p>	
Enchimento de Depressões	<ul style="list-style-type: none"> • Quando se observa no pavimento rodeiras (> que 5 mm) dos veículos pesados ao longo de um certo alinhamento longitudinal, são preenchidas com mistura betuminosa, geralmente fabricadas a quente, de modo a reperfilar/regularizar a superfície do pavimento, antes da colocação das camadas de reforço;
Selagem e/ou Tratamento de Fendas	<ul style="list-style-type: none"> • As fendas são geralmente seladas com os materiais referidos na reabilitação das camadas superficiais, utilizando sobretudo os que contêm betumes modificados com elastómeros, de modo a minimizar a reflexão de fendas, e por conseguinte, o seu aparecimento à superfície; • Para retardar o percurso das fendas ou para prevenir o seu aparecimento, empregam-se os geotêxteis impregnados com betume, com uma espessura bastante reduzida a qual é envolvida em betumes puros ou modificados; • Existem situações onde se utilizam geogrelhas ou geomalhas, pregadas ao pavimento betuminoso e revestidas por um material betuminoso, do tipo <i>slurry-seal</i>, microaglomerado betuminoso ou argamassa betuminosa incorporando betume modificado com polímeros (elastómeros).

Quadro 3.1 – Trabalhos de reabilitação preparatórios²²

Dentro dos trabalhos de reabilitação preparatória, devem-se destacar os referentes à drenagem interna e externa, cuja eficácia contribui bastante para eliminar ou retardar problemas estruturais.

Em relação ao reforço de pavimentos, esse depende do tipo de mistura betuminosa utilizada e ao número e espessuras das camadas.

Normalmente, nas técnicas de reabilitação estrutural, aplicam-se misturas betuminosas a quente, das quais se destacam os betões betuminosos. Actualmente está em ascensão a aplicação de betões betuminosos de alto módulo e betumes modificados com polímeros.

²² Adaptado de [Azevedo, 2001]

A aplicação de misturas betuminosas a frio não é muito usual, pois a sua resistência é menor comparativamente às misturas betuminosas a quente.

Na reabilitação das características superficiais foram focadas as camadas de desgaste de aplicação mais usual (revestimentos superficiais betuminosos, microaglomerados betuminosos a frio, lamas asfálticas/*slurry seal*, argamassas betuminosas, betões betuminosos, microbetões betuminosos rugosos e betões betuminosos drenantes).

De seguida, apresentam-se alguns dos materiais utilizados nas camadas que podem ser de base ou de regularização, que conjuntamente com a camada de desgaste reabilitam o pavimento existente, dotando-o de maior capacidade de carga.

3.4.2.1 Macadame Betuminoso

O macadame betuminoso é utilizado como camada de base ou de regularização com o intuito de melhorar as características estruturais e preparar uma superfície regular para a camada de desgaste colocada, também é aplicado em situações em que é necessário proceder ao reperfilamento da estrada.

Quando aplicado, dever-se-á esperar algum tempo antes do trânsito circular, para não alterar as características mecânicas que podem comprometer a capacidade estrutural. Recomenda-se que o macadame betuminoso seja aplicado em camadas com espessuras entre os 0,08 m e os 0,15 m devido à dimensão dos agregados que compõem a mistura betuminosa.

Tem ainda a tarefa comum a todas as camadas que constituem um pavimento flexível, distribuir as tensões induzidas pelo tráfego.

3.4.2.2 Mistura Betuminosa Densa

A mistura betuminosa densa é geralmente utilizada como camada de reperfilamento, de regularização e de base.

Trata-se de uma camada com características semelhantes ao macadame betuminoso, diferindo na dimensão dos agregados. A mistura betuminosa densa apresenta agregados com dimensão mais pequena comparativamente com a dimensão dos agregados do macadame betuminoso, o que permite realizar camadas de regularização com espessuras da ordem dos 0,06 m.

3.4.2.3 Mistura Betuminosa de Alto Módulo

O betão betuminoso de alto módulo apresenta notáveis características mecânicas e uma superior resistência à fadiga quando comparado com os tradicionais betões betuminosos. Como este, ostenta uma maior rigidez, observa-se uma diminuição das deformações permanentes.

Esta técnica permite que os reforços sejam mais duráveis mesmo com menores espessuras. O seu emprego é recomendável tanto para reforços como para a construção de estradas que exibem tráfegos agressivos e elevados e em locais que não permitem grandes espessuras, como nas auto-estradas, nas estradas urbanas e urbanas periféricas, onde os condicionalismos de subida de cotas são muito frequentes.

Outras vantagens que decorrem da diminuição da espessura das camadas são as seguintes [Batista, 2004]:

1. Redução da utilização dos recursos naturais (agregados/betume);
2. Redução dos volumes de transporte de materiais e consequentemente redução nos custos de transporte;
3. Redução dos tempos de execução à camada e consequentemente redução dos custos suportados pelos utentes durante as obras (resultantes de atrasos ou acidentes);

A utilização deste tipo de misturas apresenta uma desvantagem, que está relacionada com o facto de ser necessária uma temperatura mais elevada, quer para o fabrico, quer para a sua aplicação em obra, que obriga a maiores consumos energéticos e coloca maiores problemas de compactação, sobretudo em tempo frio.

O segredo de se poder reduzir a espessura com excelentes características resistentes reside no facto do betão incluir na sua mistura um ligante específico (10/20) com reduzidas penetrações.

Como camada de desgaste, a sua aplicação não é muito aconselhável devido à sua rigidez, que sob o efeito de variações de temperatura pode sofrer fendilhamento por retracção. Portanto, sugere-se que seja aplicada como camada de base ou de regularização contribuindo para uma estrutura com uma maior capacidade resistente.

3.4.2.4 Agregado de Granulometria Extensa Tratado com Emulsão de Betume

A utilização do agregado de granulometria extensa tratado com emulsão de betume, serve de complemento à reabilitação do pavimento, ou seja, é empregado para se efectuar reparações em zonas pontuais, reperfilamentos ou reforços de pavimentos que ostentem grandes deformações. É ainda aplicado em camadas de base ou de regularização em estradas com tráfego pouco intenso e requer sempre a colocação de uma camada de desgaste, pois é uma técnica com características mecânicas reduzidas.

É recomendável a execução de espessuras inferiores a 15 cm, para não dificultar a evaporação da fase aquosa da emulsão. Também não deve aplicar-se a mistura em temperaturas muito baixas, pois dar-se-ia uma rotura muito rápida da emulsão.

Trata-se de uma técnica económica, pois apresenta a vantagem de se aplicar em zonas longe das centrais de fabrico de misturas betuminosas a quente, sendo assim preferível a reabilitações a quente em estradas com pouco tráfego.

É uma mistura que requer uma formulação específica, tendo em atenção o teor óptimo de humidade e a qualidade dos agregados para se criar uma massa homogénea. O tipo de ligante depende nomeadamente do tempo de armazenagem.

A aplicação deve ser feita quando a temperatura ambiente é superior a 2 °C, no caso de emulsões catiónicas e superior a 10 °C, no caso de emulsões aniónicas. Para a compactação, recorre-se aos cilindros de pneus, vibradores ou mistos, para obter uma compactação de referência.

Sempre que a estrada seja aberta ao tráfego, com este tipo de tratamento e sem a camada de desgaste, a superfície deve levar uma rega de colagem coberta com gravilha.

3.4.2.5 Técnicas Anti-fendas

O aumento do tráfego em carga e em intensidade têm retardado a fluência do mesmo resultando no aumento das congestões e paragens de trânsito rodoviário. Velocidades baixas e elevadas cargas manifestam-se em elevadas tensões nos pavimentos das redes viárias existentes [S&P, 2005].

Quando na camada de desgaste estão patentes diversos tipos de fissuras (fissuras de fadiga térmica, fissuras de fadiga de cargas de tráfego e fissuras de reflexão) e de deformação (deformação estrutural da fundação e deformação plástica das camadas do pavimento), essas, comprometem a eficácia e a duração do pavimento ou do reforço do pavimento conduzindo-os para uma capacidade estrutural diminuta.

Num pavimento reabilitado, sob a acção do tráfego e das variações de temperatura, ocorrem tensões elevadas na zona inferior das camadas betuminosas de reforço, junto das fendas das camadas betuminosas existentes. Esta concentração de tensões pode conduzir a uma iniciação de fendas na camada adjacente, em geral na continuação das existentes nas camadas antigas. À fase de iniciação das fendas, segue-se uma fase de propagação dessas fendas através da camada de reforço [Batista, 2004].

Segundo os métodos convencionais de reabilitação de pavimentos, para eliminar a propagação das fendas, existem técnicas como a fresagem de uma dada espessura do pavimento de suporte e colocação de um reforço, a reciclagem e regeneração da camada afectada, utilizando ligantes, por vezes reforçados com aditivos, e procedendo na maioria dos casos à correcção da composição granulométrica. Nos últimos tempos têm surgido técnicas que eliminam a propagação de fendas e outras que ajudam a retardar o seu aparecimento, que dispensam a fresagem das camadas fendilhadas.

As técnicas anti-fendas podem ser consideradas como um contributo para um melhoramento significativo da capacidade estrutural de um pavimento, aumentando a sua durabilidade e diminuindo as operações de manutenção.

Para prevenir o aparecimento de fendas à superfície ou para reduzir a sua velocidade de propagação, geralmente recorre-se à aplicação de geotêxteis impregnados com ligantes betuminosos, argamassas betuminosas, geogrelhas ou à utilização de misturas modificadas com polímeros ou com borracha reciclada de pneus, com certas características que ostentam uma maior resistência. Assim, estes elementos, têm como principal função absorver a concentração de tensões geradas na interface entre as camadas existentes e as camadas de reforço novas.

Como camadas de prevenção ou retardamento de fissuras na superfície dos pavimentos, tem-se:

- **Selante de fissuras e juntas (*asphalt-rubber crack/joint sealant*)**

Trata-se de um revestimento com uma consistência de uma lama, que sela e impermeabiliza os pavimentos.

- **SAM (*Stress Absorbing Membrane*)**

Trata-se de um tratamento superficial com betume modificado com polímeros ou com borracha reciclada de pneus, geralmente usado para prevenir e/ou retardar a formação de fendas por reflexão em pavimentos betuminosos.

- **SAMI (*Stress Absorbing Membrane Interlayer*)**

Trata-se de uma camada de betume modificado com polímeros ou com borracha reciclada de pneus, aplicada entre a camada do pavimento existente e a camada de reforço, aquando a execução de uma reabilitação, também com o objectivo de retardar o desenvolvimento de fendas por reflexão e reduzir a penetração de água em camadas adjacentes [Hicks, 1995].

As membranas referidas anteriormente podem ser materializadas por diversos tipos de materiais e podem desempenhar distintas funções. Essa interface ao ser aplicada, vai absorver os esforços elevados, não deixando que sejam transmitidos directamente para o reforço, conseguindo-se assim retardar o desenvolvimento das fendas (fadiga e reflexão) e de deformações estruturais.

Neste tipo de interface também se enquadram as grelhas de poliéster, polipropileno, vidro ou de aço, que funcionam como uma camada maleável com uma rigidez muito baixa, que se deformam sem fendilhar ao absorver certas tensões induzidas pelo tráfego e pelas condições atmosféricas. Essas grelhas são aplicadas sobre um pavimento existente fissurado, antes da aplicação da nova camada de reforço.

É de salientar, que a aderência das grelhas convencionais, de poliéster, de polipropileno ou de vidro, têm um conteúdo insuficiente de betume, resultando numa aderência baixa entre essa superfície e a nova camada de revestimento, sobretudo nos casos de sobreposição, de instalação, de irregularidades no pavimento que originam ondulações na estrutura da grelha, e nos casos de colocação em zonas inclinadas e apertadas que existe probabilidade de deslocamento da grelha [S&P, 2005].

Uma nova geração de grelhas de vidro estão disponíveis há alguns anos. Pré-impregnadas em betume polimérico ou em betume modificado com borracha reciclada de pneus, oferecem uma excelente aderência que previne todo e qualquer movimento durante a instalação do novo pavimento de revestimento [S&P, 2005]. A aplicação desse tipo de materiais, fazem com que as fendas existentes se multipliquem por muitas mais (microfendas) atrasando a fendilhação.

As grelhas intercalares são um material em forma de rede quadrada ou rectangular, constituída por polipropileno, polietileno, poliéster, fibra de vidro, fibra de carbono ou aço, como se pode observar na Figura 3.7. As grelhas que existem actualmente no nosso mercado possuem várias opções de espessura e abertura de malha, podendo ser usadas para qualquer espessura de revestimento.

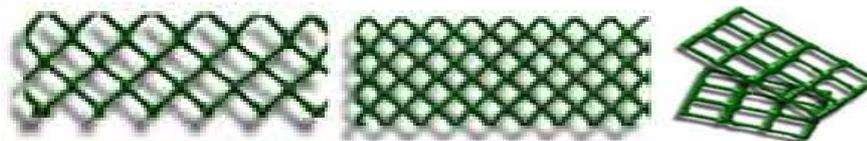


Figura 3.7 – Exemplos de grelhas

As armaduras são usadas para resolver os casos mais agressivos de fendilhamento, são compostas por uma malha de aço ou ferro galvanizado.

Para retardar o percurso das fendas, empregam-se os geotêxteis impregnados com betume, que consistem numa malha de fios de polipropileno ou poliéster, com uma espessura bastante reduzida a qual é envolvida em betumes puros ou modificados. Têm como função, reforçar, estabilizar, separar,

drenar, filtrar e impermeabilizar os pavimentos rodoviários. Segundo a S&P²³, os geotêxteis impregnados com betume, têm as seguintes propriedades:

- Membrana intercalar de absorção de tensões (têm como objectivo principal reduzir e redistribuir as tensões);
- Selante de ingresso de água e sais;
- Barreira para evitar a ascensão de água sob forma de vapor por capilaridade;
- Compensação de pequenos deslocamentos verticais nas juntas.

A adopção de medidas retardadoras da reflexão de fendas, ao dispensar a fresagem das camadas fendilhadas do pavimento existente e a sua reposição com misturas betuminosas novas, apresenta como vantagens não só o facto de proporcionar a eliminação dos volumes a vazadouro, mas também, a possibilidade de tirar partido da eventual contribuição da camada fendilhada para o comportamento estrutural do pavimento, com a consequente economia e redução da utilização dos recursos naturais (agregados e betumes) [Batista, 2004]. Uma outra grande vantagem que se obtém aplicando as interfaces referidas anteriormente, é a impermeabilização do pavimento que mesmo quando a sua camada de desgaste apresenta fendilhação, impede a rápida infiltração para as camadas subjacentes, impedindo uma rápida degradação estrutural.

As grelhas e/ou os geotêxteis podem ser utilizados ainda em situações de beneficiação de uma dada estrada que contemple o reforço e alargamento do seu pavimento. As interfaces utilizadas na zona de junção entre o pavimento existente e o alargamento permitem que retarde o aparecimento de uma fenda longitudinal à superfície, resultante do diferencial natural entre as duas distintas estruturas.

O emprego de quaisquer tipos de técnicas anti-fendas, requer sempre que se obtenha uma boa ligação com o suporte, para que o conjunto funcione de uma forma harmoniosa. A escolha do tipo de técnica vai depender da gravidade observada e do nível de serviço da estrada. Por vezes, para se reabilitar um pavimento, a aplicação das técnicas anti-fendas, tem custos consideráveis, o que implica adoptar outra solução, em que os custos sejam mais razoáveis.

3.4.3 Reabilitação de Pavimentos Recorrendo a Técnicas de Reciclagem

Em grande medida devido ao enorme esforço de construção de estradas que nos últimos anos tem vindo a ser desenvolvido no nosso país, por vezes em detrimento de uma conservação atempada dos pavimentos em exploração, estes têm atingido frequentemente estados de degradação tais que determinem a fresagem das camadas superiores do pavimento, por vezes áreas extensas. Segundo os procedimentos tradicionais, estes materiais são considerados como resíduos e transportados a vazadouro [Batista, 2004].

A reciclagem de pavimentos permite a reabilitação de pavimentos e consiste na reutilização dos materiais provenientes dos pavimentos em serviço, onde os materiais constituintes dos mesmos se encontram deteriorados, tendo perdido grande parte das suas propriedades iniciais, ou cujas

²³[S&P, 2005]

características se pretende melhorar [Vieira, 2003]. Estas propriedades são basicamente a capacidade estrutural ou resistência mecânica, resistência à acção da água e resistência à fadiga que foram parcialmente ou totalmente eliminadas.

A reciclagem do pavimento existente, permite eliminar diversos tipos de patologias, como por exemplo, as fendas. A fresagem do pavimento e a colocação de uma nova camada com a mesma espessura da existente, permite que esta técnica seja utilizada em zonas urbanas, onde existem muitas cotas de soleiras a respeitar. O material fresado pode ser aplicado aquando da construção de aterros, bermas e fundação de pavimentos. Pode ser ainda reaproveitado e aplicado em construção de estradas novas e na reabilitação de pavimentos antigos. Do ponto de vista ambiental, a reciclagem de pavimentos rodoviários pode constituir um ciclo de construção óptimo [Azevedo, 2005], como se ilustra na Figura 3.8.

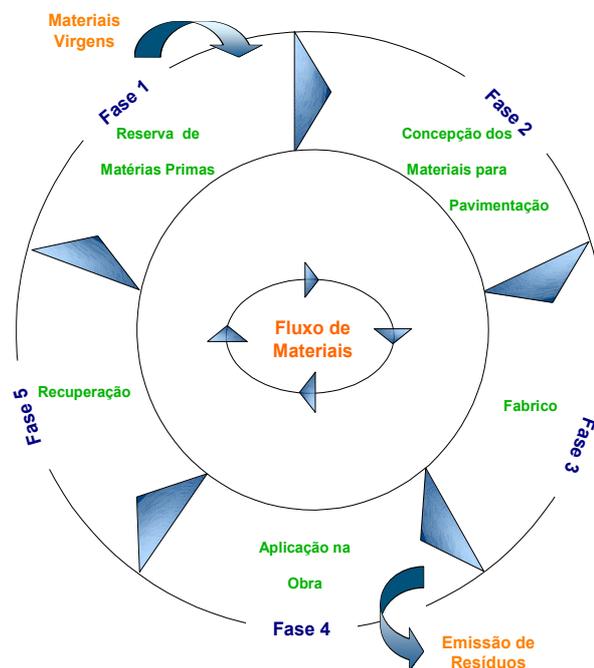
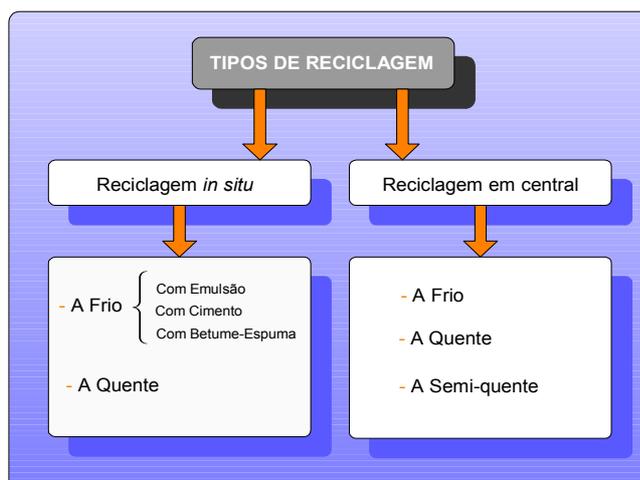


Figura 3.8 – Ciclo fechado de construção²⁴

A reciclagem das camadas betuminosas existentes permite dar uma resposta adequada ao problema cada vez maior de escassez de agregados e à crescente dificuldade de encontrar vazadouros para o material proveniente da fresagem de pavimentos [Vieira, 2003]. De salientar, para o facto de se poder reciclar mais materiais com o intuito de aplicá-los na construção e reabilitação de estradas, como são exemplo os pneus usados, escórias, telhas de cobertura, lamas, etc. Com as questões ambientais cada vez mais exigentes, no futuro, tudo indica que as técnicas de reciclagem irão assumir uma importância extrema. As principais técnicas de reciclagem que têm vindo a ser desenvolvidas, podem ser de dois tipos: *in situ* e em central (Figura 3.9).

²⁴ Adaptado de [PIARC, 2001]

Figura 3.9 – Tipos de reciclagem²⁵

Nos últimos anos, tem-se feito sentir um esforço na reutilização na rede rodoviária nacional das misturas betuminosas que se encontram degradadas por reciclagem *in situ* ou em central. A reciclagem *in situ* mais utilizada é a frio, utilizando como ligante betuminoso as emulsões betuminosas ou o cimento. A reciclagem em central é também utilizada, principalmente nos casos em que há lugar a fresagem significativa das misturas betuminosas.

Cada técnica tem as suas vantagens e desvantagens. A reciclagem *in situ*, tem a vantagem de não necessitar de transporte e armazenamento, que a torna mais económica em relação à reciclagem em central. No entanto, em central, a vantagem é a de obter as misturas com mais qualidade, mas com custos mais elevados [Azevedo, 2004].

A escolha de técnicas de reciclagem para reabilitar pavimentos, pode ser fundamentada com base nas seguintes vantagens:

1. Eficácia na resolução dos problemas existentes;
2. Desempenho a longo prazo;
3. Vantagens do ponto de vista de segurança viária;
4. Minimização dos custos dos utentes;
5. Minimização dos custos de obra;
6. Minimização dos impactos ambientais.

Contudo, a implementação deste tipo de técnica de reabilitação de pavimentos, encontra limitações: carências de especificações técnicas específicas e falta de informação a nível de projecto de execução.

3.4.3.1 Reciclagem *In Situ* a Frio

A reciclagem de pavimentos *in situ* é sobretudo recomendável para reabilitar os que apresentem avançados estados de ruína (preferencial pouco deformados) [Miranda, 2005].

²⁵ Adaptado de [PIARC, 2001]

A reciclagem a frio utiliza a técnica da fresagem na qual o pavimento é removido a uma profundidade desejada [Lima, 2003].

O material da construção inicial, degradado, é então reciclado processado, formando uma nova camada do pavimento de resistência mecânica melhorada.

O processamento do material recuperado envolve individualmente ou em combinação: água, para ajudar na compactação, cimento, cal ou outros tipos de agentes químicos estabilizadores, agente betuminoso de estabilização, em forma de emulsão e, eventualmente, agregados novos de modo a melhorar a granulometria ou para modificar mecanicamente o material reciclado [Azevedo, 2004].

- **Reciclagem a frio *in situ* com a adição de emulsão betuminosa**

Esta técnica consiste, basicamente, na demolição e desagregação *in situ* das camadas betuminosas (em conjunto ou de um só tipo), correntemente por acção de um tambor fresador com características adequadas, em associação com dispositivos que permitam um certo grau de britagem dos inertes e a desagregação das placas de mistura betuminosa levantadas (o tambor roda de baixo para cima em relação ao sentido da progressão), pulverizando-se simultaneamente com a emulsão [Miranda, 2005]. Segue-se depois e espalhamento da mistura e a compactação.

Ao material colocado no tambor, são acrescentados novos materiais, como cimento, areia, cal e agregados para se conseguir obter características específicas, como facilitar ou acelerar a rotura, reduzir a sensibilidade à água e aumentar a coesão. Esses, para além de enriquecer o “mastique betuminoso”, têm a vantagem adicional de absorver parte da água livre, resultante do processo construtivo e, desse modo, acelerar o processo de cura que, nas “misturas” em causa, consiste precisamente no desaparecimento da água [Pereira e Miranda, 1999].

Neste tipo de misturas, o controlo da água é muito importante, devido sobretudo ao processo de compactação. Como o teor em betume (emulsão betuminosa) é relativamente baixo, existe a necessidade de adicionar água, especialmente se os agregados se apresentem secos, para se poder obter um grau óptimo de compactação. Refira-se ainda que, nem o cimento actuará como ligante hidráulico, mas somente como filer, nem o antigo ligante (normalmente muito endurecido) voltará a desempenhar aquela função, mas sim o papel de agregado, em conjunto com os elementos minerais por ele ligados [Pereira e Miranda, 1999].

Assim, esta técnica, permite uma transmissão de esforços de compressão através de pontos de contacto dos agregados de maiores dimensões com uma degradação de cargas maior devido ao mastique.

A utilização desta técnica na reabilitação de pavimentos, apresenta duas grandes vantagens: reaproveitamento do material pétreo e do próprio ligante. Contudo, segundo Merighi²⁶ e Miranda²⁷, a reciclagem a frio ainda apresenta outras vantagens e desvantagens:

1. O consumo energético é muito menor na medida em que não existe a necessidade de aquecimento dos materiais, nem o transporte do material;

²⁶[Merighi, 2003]

²⁷[Miranda, 2005]

2. Ausência de emissão de fumos ou de produtos aromáticos contaminantes para a atmosfera;
3. Como a adição tanto da água como dos ligantes betuminosos são controlados por micro-processadores nas bombas hidráulicas, é possível obter uma qualidade das camadas recicladas espessas e com boa homogeneidade, além de permitir assegurar a construção de camadas com resistência e módulos resilientes pré-definidos;
4. Redução do tempo de construção: ao comparar-se a reciclagem com a remoção convencional da camada e posterior execução da nova camada. Isso traduz-se em aumento de segurança e menor tempo de espera para os utilizadores aquando do serviço sem a interrupção do tráfego, uma vez que todo o equipamento de reciclagem se desloca em faixas pré-estabelecidas;
5. Facilidade de execução;
6. Reaproveitamento de materiais *in situ*, com implicações inerentes: não se regista a poluição e custos associáveis ao transporte intensivo, minimiza-se a espessura das eventuais camadas de reforço;
7. Possibilidade de manter as cotas da rasante;
8. Evita a introdução de interfaces retardadoras do processo de propagação de fendas, quando for o caso;
9. É potencialmente uma solução económica;
10. Existe a dificuldade de aplicar esta técnica, devido à sensibilidade deste processo a factores como, o teor em humidade, granulometria dos agregados e climáticos;
11. O material reciclado fica com características de camada de base, pelo que não é utilizado como camada de desgaste;
12. Falta de documentos normativos;
13. Finalmente, deve-se esclarecer, que a reciclagem não resolve todos os problemas de recuperação de pavimentos. Se as deflexões forem corrigidas, mas se a sua origem estiver na fundação, não há reciclagem que resolva o problema.

É de realçar, que as espessuras interessadas na reciclagem são geralmente de 12 a 15 cm, com valores máximos de 20 cm. O tratamento de espessuras menores, 5 a 6 é possível em muitos casos, não com o objectivo de melhorar directamente a capacidade de suporte do pavimento, mas para efeitos, por exemplo, de impermeabilização do pavimento, ou outra [Azevedo e Cardoso, 2003].

- **Reciclagem a frio *in situ* com a adição de cimento**

O reciclado *in situ* com cimento é uma solução para o reforço estrutural de pavimentos degradados cuja aceitação e popularidade é cada vez maior em todo o mundo.

A técnica do reciclado *in situ* com cimento consiste essencialmente em transformar um pavimento degradado numa base homogénea, obtendo assim um incremento da capacidade de

carga, adaptando-a às solicitações da tráfego. Mais concretamente, consiste em reutilizar as materiais existentes para a construção de uma nova base de pavimento, mediante a escarificação e desagregação desses materiais, numa determinada profundidade, misturando-os com uma percentagem de ligante (cimento), de água (para hidratação do ligante), eventualmente agregados (como correctores granulométricos) e algum aditivo, respeitando uma dosificação obtida através de ensaios prévios. A mistura homogénea destes materiais, depois de nivelada, compactada e curada, constitui a base do novo pavimento. Sobre a nova base aplica-se um tratamento superficial como forma de protecção às solicitações do tráfego durante o decorrer da obra, sendo depois eventualmente aplicada(s) uma(s) mistura(s) betuminosa(s) para assegurar a funcionalidade do pavimento [Simões e Paul, 2002].

Existem duas formas distintas de se adicionarem o cimento e a água: ou se adiciona o material fresado, o cimento e a água em separado; ou em alternativa, misturam-se previamente o cimento e a água, injectando-se posteriormente a calda assim formada ao material fresado.

As dosagens de cimento não têm sido superiores a 5%, devido ao fenómeno de retracção térmica destes materiais.

É usual proceder-se à pré-fissuração transversal ordenada, com tempos de execução baixos. Nas obras realizadas no país, de modo a evitar a realização de pré-fissuração da camada acabada de executar, tem-se aplicado sobre esta uma camada de mistura betuminosa fabricada com betume modificado com elastómero ou com borracha [Azevedo, 2004].

A técnica de reciclagem *in situ* com cimento tem como vantagens [Simões e Paul, 2002]:

1. Aproveitamento dos materiais envelhecidos, contaminados ou de características inadequadas do pavimento existente, tornando-os numa base tratada homogénea e estável, aumentando a capacidade de carga;
2. Elimina ou reduz os vazadouros, reduz a extracção de mais materiais nas pedreiras, com as vantagens meio-ambientais que tal facto envolve, reduzindo assim o emprego de novos inertes por vezes muito difíceis de encontrar perto de obras;
3. Diminui os transtornos causados pelo tráfego de obra minorando as possibilidades de causar danos nas estradas adjacentes, devido ao reduzido volume de transportes de inertes;
4. Permite manter a rasante inicial, o que se torna muito útil em casos de passeios e lancis bem como *gabarits* reduzidos;
5. Permite uma rápida abertura ao trânsito (tempo de execução muito reduzido relativamente às soluções tradicionais);
6. Uma vez que é uma técnica a frio reduz o consumo de energia bem como a emissão de vapores nocivos;
7. Tem um custo mais reduzido relativamente a uma solução tradicional, podendo mesmo chegar a reduzir o custo em 30% relativamente a um reforço ou reconstrução.

As desvantagens na aplicação desta técnica descrevem-se de seguida como [Simões e Paul, 2002]:

1. Necessita de pessoal especializado e experiente a trabalhar com este tipo de equipamento, uma vez que qualquer paragem, qualquer sobreposição mal executada ou uma compactação menos conseguida pode provocar o aparecimento de zonas instáveis;
2. O material reciclado é mais heterogéneo do que uma composição nova;
3. O nivelamento deste material, devido sobretudo à sua heterogeneidade, torna-se muito difícil de ser efectuado com os meios tradicionais (motoniveladora). Sugere-se assim que, para este tipo de estradas, seja aplicada uma mistura betuminosa de regularização com 0,03 m sobre o reciclado, seguida de uma camada de desgaste;
4. Uma vez que o reciclado é efectuado por faixas de 2,5 m, poderão aparecer fissuras longitudinais. Poderão também aparecer fissuras transversais devido à retracção do cimento;
5. Relativamente à operação de simples reforço, quando não é necessária a fresagem, esta é uma técnica mais lenta sendo contudo de carácter mais estrutural;
6. Dificuldades na obtenção da fórmula de trabalho, por um lado devido à dificuldade de colheita de uma amostra representativa do material depois de ser escarificado, por outro lado, no caso de pavimentos heterogéneos, devido à dificuldade em estabelecer limites físicos dos diferentes tramos.

- **Reciclagem a frio *In Situ* com a adição de betume espuma**

Trata-se de uma técnica de reciclagem *in situ* recente, com poucas utilizações em Portugal.

A espuma de betume é um sistema coloidal. A sua produção é conseguida quando uma pequena quantidade de água é adicionada ao betume quente (usualmente acima de 170°). A esta temperatura a água passa ao estado de vapor. O sistema obtido é altamente instável, o vapor provoca uma expansão do betume de quinze vezes o seu volume original, mas imediatamente este volume começa a diminuir, após poucos segundos (cerca de 25) o volume reduz para metade. A espuma de betume apresenta uma elevada superfície específica e muito baixa viscosidade. Em contacto com o agregado, reveste as partículas finas formando um mastique que une a mistura. O facto da espuma ser instável obriga a que o envolvimento desta com o agregado seja quase imediato. A mistura obtida tem uma elevada estabilidade podendo ser trabalhada posteriormente, sem perda de resistência, desde que não haja alterações significativas da humidade após a compactação. Inclusivamente pode ser armazenada para posterior aplicação [Ribeiro, 2003].

Apesar do aquecimento necessário à produção da espuma de betume, este processo de reciclagem é considerado “a frio” dado que, quer a mistura dos diversos componentes (espuma de betume + material fresado + eventual material correctivo), quer a aplicação e compactação da mistura são efectuados à temperatura ambiente [Batista, 2004].

As propriedades da espuma de betume, formada a partir de um dado betume, dependem principalmente da temperatura do betume aquando da adição de água, da quantidade de água adicionada e da pressão a que o betume é injectado na câmara de expansão.

A reciclagem com betume espuma é uma técnica que consiste na fresagem de um pavimento betuminoso já existente, já degradado, até uma certa profundidade, mistura do material fresado, sem aquecimento, com betume espuma, seguido do espalhamento da mistura e sua compactação, obtendo-se no final uma camada betuminosa de base de melhores características.

Geralmente a estrutura do pavimento é concluída com a execução de uma nova camada de desgaste, normalmente constituída por uma mistura betuminosa a quente, podendo no entanto, para casos de reduzido tráfego, o projecto prever apenas um tratamento superficial betuminoso [Azevedo e Cardoso, 2003].

Como principais vantagens da espuma de betume pode citar-se [Merighi, 2003]:

1. Facilidade de aplicação, uma vez que a mistura se dá dentro da câmara de expansão da recicladora e é aplicada directamente na via;
2. Apresenta baixa permeabilidade, o que evita a entrada de água no pavimento através de sucção capilar;
3. A camada obtida é flexível e tem boa resistência à fadiga.

Segundo Ribeiro²⁸, a reciclagem *in situ* com espuma de betume, permite a utilização de uma diversidade de materiais, mesmo materiais húmidos, a circulação da trânsito pode ser reposta logo após a compactação, permite economizar energia, pois só é necessário aquecer o betume (para efectuar essa operação são necessários equipamentos especiais e precauções em segurança específicas) e também existe um decréscimo de transporte de materiais. Esta técnica apresenta ainda outras vantagens como, a rapidez de execução, a economia de materiais pétreos o que consequentemente diminui a sua extracção e supressão de materiais levadas a vazadouro. Estas vantagens incidem sobretudo para a resolução de problemas ecológicos.

Os trabalhos de reciclagem mostraram ser esta técnica uma boa alternativa técnica e económica a soluções mais tradicionais, nomeadamente as que contemplam o saneamento do pavimento existente e a execução de novas camadas [Azevedo e Cardoso, 2003].

3.4.3.2 Reciclagem *In Situ* a Quente

A reciclagem *in situ* a quente é muitas vezes designada termogeneração, termoreperfilagem ou termoreciclagem [Azevedo e Cardoso, 2003].

Os domínios de emprego da reciclagem a quente são, principalmente, as reabilitações de pavimentos com problemas de descolagem da interface entre a camada de desgaste e o suporte, no tratamento de pavimentos degradados e na reparação de fendas da camada de desgaste, devido ao envelhecimento do betume e no tratamento de vias para tráfego pesado bastante degradadas [Pereira e Miranda, 1999].

As desvantagens desta técnica estão relacionadas com o seu custo elevado, em comparação com as outras técnicas concorrentes, além da produção de poluição. Outras desvantagens relacionam-se com a

²⁸ [Ribeiro, 2003]

dificuldade de aplicação da técnica em locais com obstáculos no pavimento e com os gastos elevados de energia para o aquecimento, no caso de tempo desfavorável [Pereira e Miranda, 1999].

Ao anterior grupo de desvantagens acrescenta-se ainda o elevado custo dos equipamentos específicos para realização do processo de reciclagem.

Esta técnica de reabilitação de pavimentos, consiste na remoção mecânica do pavimento betuminoso existente, através do aquecimento e conseqüente amolecimento (fresagem a quente). Ao material removido, mistura-se o betume, os agregados minerais e agentes rejuvenescedores. Essa mistura reciclada é reposta sobre o pavimento remanescente.

A reciclagem a quente *in situ* pode ser feita apenas com uma operação de passagem única do equipamento reciclador, que combina o pavimento restaurado com materiais virgens, ou com dupla passagem onde o material reciclado é compactado, seguido da aplicação de uma nova camada betuminosa [Terrel *et al.*, 1997].

A regeneração do ligante betuminoso torna-se muito limitada, pela oxidação a que o betume envelhecido é sujeito, devido à passagem dos painéis radiantes. Outra limitação desta técnica é a espessura a regenerar, uma vez que, para se conseguirem temperaturas suficientes em espessuras mais elevadas, conduz a um aquecimento excessivo da superfície. As espessuras máximas recomendadas são geralmente na ordem de 6 ou 7 cm.

Existem três processos no âmbito da reciclagem a quente:

1. *Heater Scarification* (Escarificação com Aquecimento) – Este processo consiste no aquecimento, escarificação, rejuvenescimento, nivelamento, reperfilamento e compactação do pavimento;
2. *Repaving* (Repavimentação) – Este processo utiliza a mesma metodologia de trabalho do *Heater Scarification*, no entanto, uma nova camada de betuminoso é aplicada em cima da superfície reciclada;
3. *Remixing* – Este processo é semelhante aos anteriores, diferenciando-se apenas na colocação de um revestimento mais espesso, e uma melhoria do pavimento reciclado com correções na granulometria do agregado ou ajustes na propriedade do ligante.

3.4.3.3 Reciclagem a Frio em Central

Esta técnica de reciclagem actua essencialmente ao nível das características superficiais, melhorando inclinações transversais e longitudinais, ondulações e deformações. Também permite corrigir problemas de rugosidade superficial.

A técnica de reciclagem em central inicia-se com a fresagem do pavimento degradado, que depois é recolhido e transportado para a central, onde será reutilizado como agregado de novas misturas betuminosas a frio.

O tipo de central fixa mais utilizado para o fabrico destas misturas é a central contínua com crivagem integrada [Pereira e Miranda, 1999]. Nesta central os agregados novos são transportados para um tambor-secador, do qual caem para uma célula de crivagem, onde se obtêm as diversas fracções granulométricas. Os agregados novos, são então misturados com o material reciclado, a emulsão

betuminosa, a água e o filer, numa unidade misturadora com duas pás que circulam em sentido oposto. Daí a mistura será transportada para os silos de armazenamento e para camiões [Pereira e Miranda, 1999].

Depois de aplicada e compactada a mistura, esta técnica requer a colocação de uma camada de desgaste de modo a finalizar a execução dos trabalhos.

Na aplicação desta técnica podem-se referir algumas vantagens: maior controlo da qualidade da mistura betuminosa (comparando a reciclagem a frio *in situ*), economia de materiais e de energia, permite que as cotas se mantenham iguais às do pavimento antigo e permite ainda melhorar as características superficiais e estruturais.

Na aplicação desta técnica há que ter em consideração uma série de factores, especialmente na formulação da mistura. A profundidade da fresagem, também assume um papel de extrema importância, não se devem atingir profundidades superiores a 15 cm, para não existir o problema de cura da emulsão betuminosa e o aumento dos custos da fresagem.

Comparativamente com a reciclagem a frio *in situ* apresenta outras desvantagens: transporte do material fresado do local da obra até à central, necessidade de locais que permitam o depósito do material, tempo de execução superior, um maior desperdício de materiais, maior número de equipamentos de fabrico da mistura e um maior incómodo para os utentes.

Quando bem executada, esta técnica, assemelha-se a um material de granulometria extensa tratado com emulsão, o que representa um ganho estrutural em relação ao anterior pavimento fendilhado [Pereira e Miranda].

3.4.3.4 Reciclagem a Quente em Central

A reciclagem a quente consiste num método no qual o pavimento existente é removido por intermédio de uma fresadora ou de outro equipamento capaz de retirar a camada superficial, total ou parcialmente, a uma profundidade previamente estabelecida, que é depois transportada para a central, para que possa ser reciclada.

Um dos aspectos importantes a considerar no processo de fabrico das misturas betuminosas recicladas a quente, tem a ver com o sistema adoptado para o aquecimento das misturas retiradas de pavimentos antigos a reciclar. Em função do processo adoptado para o aquecimento deste material, assim serão as percentagens permitidas para incorporar no fabrico de misturas betuminosas a quente [Batista, 2004].

As limitações à quantidade de material fresado a reciclar, prendem-se, fundamentalmente, com o facto de este ser um material constituído por agregados e betume envelhecido, que requer cuidados especiais durante o seu aquecimento, em particular, no que respeita à temperatura empregue, que não deve exceder determinados valores por forma a não se propiciar ainda mais o envelhecimento de um betume já por si envelhecido [Batista, 2004].

O fabrico deste tipo de misturas é realizado no mesmo tipo de centrais fixas que as utilizadas para o fabrico das misturas betuminosas a quente convencionais, sendo, no entanto, necessário introduzir algumas modificações às referidas centrais de forma a adaptá-las para esse efeito.

As centrais de produção a quente de misturas betuminosas encontram-se divididas em centrais contínuas ou de tambor secador misturador e em centrais descontínuas (por amassadura) (Figura 3.10).

No caso das centrais contínuas estas, permitem a incorporação de 10 a 50% de material a reciclar, enquanto que centrais descontínuas o valor situa-se entre os 10 e os 70% [Batista, 2004]. Ou seja, conforme o processo de fabrico, em função do processo adoptado para o aquecimento do material, assim serão as percentagens permitidas para a sua incorporação no fabrico de misturas betuminosas a quente.

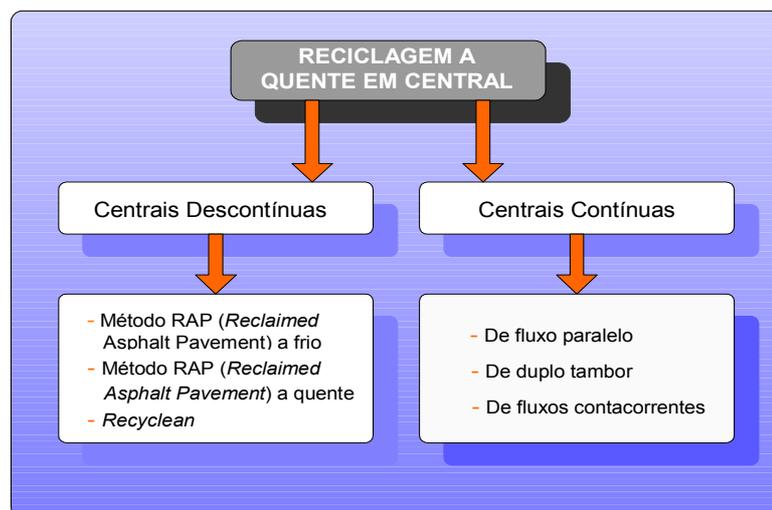


Figura 3.10 – Reciclagem a quente em central

De um modo resumido, nas centrais contínuas ou de tambor secador, as misturas betuminosas a reciclar são, após processamento, introduzidas na zona central do tambor secador-misturador, onde estão protegidas da chama do queimador. Assim, o aquecimento das misturas betuminosas fresadas é feito quer pelos gases de combustão quentes, quer pelo contacto com os agregados sobreaquecidos a incorporar na mistura betuminosa [Batista, 2004].

Os métodos utilizados, no caso das centrais betuminosas descontínuas, implicam que o material a reciclar tenha que ser britado antes de qualquer procedimento posterior [Azevedo e Cardoso, 2003].

Nas centrais descontínuas, uma das formas mais simples de se adaptarem as instalações ao fabrico de misturas incorporando materiais fresados, é introduzir o material reciclado directamente no misturador. Neste caso, o aquecimento e a desidratação das misturas betuminosas fresadas é feito através do contacto com os novos agregados sobreaquecidos [Batista, 2004].

Existe, ainda, outro tipo de centrais descontínuas, denominadas Central Torre, (princípio de armazenamento intermédio de agregados aquecidos), nas quais o processo de secagem constitui uma parte distinta de todo o processo e pode mesmo ser efectuado, até certo ponto, independente do processo de mistura. Em vez de entrar no misturador, logo após serem aquecidos e secos, os agregados são transportados para silos aquecidos apropriados, que se encontram localizados por cima da unidade de mistura, de acordo com a sua fracção granulométrica, para armazenamento intermédio.

A técnica de reciclagem a quente em central apresenta as seguintes vantagens [Azevedo, 2004]:

1. A reciclagem afigura-se uma técnica interessante para o tratamento de pavimentos com problemas de fendilhamento, irregularidades ou outro tipo de patologias;

2. É uma solução económica, relativamente às soluções tradicionais de reforço do pavimento;
3. Apresenta vantagens do ponto de vista ecológico e de protecção do meio ambiente, ao não ser necessário recorrer a vazadouros e à extracção de agregados novos, e no caso da reciclagem a frio não aplicar calor às misturas betuminosas do pavimento (consumo de energia e emissão de voláteis);
4. Dota o pavimento de características estruturais muito elevadas, da mesma ordem de grandeza das misturas betuminosas tradicionais pelo que pode ser aplicada em pavimentos sujeitos a tráfegos pesados importantes.

No entanto, afigura-se que devem ser melhorados os seguintes aspectos [Azevedo e Cardoso, 2003]:

1. Definição dos estudos e ensaios de formulação e de controlo das características dos materiais;
2. Conhecimento do comportamento dos materiais reciclados e a sua evolução no tempo (características resistentes e previsões de durabilidade).

Em resumo, considera-se que a técnica de reciclagem é uma tecnologia muito interessante e com um futuro muito prometedo, pelo que devem continuar as experiências e as investigações para melhorar as características dos materiais, dos equipamentos, e o tipo do controlo de execução das obras, de modo a assegurar a qualidade final exigida. A reciclagem, é assim, mais uma opção de reabilitação de pavimentos degradados, e não deve reciclar-se simplesmente porque é um cenário ecológico, mas sim, porque é tecnicamente adequado e dela derivam vantagens económicas, tanto para as empresas como para as administrações. O possível interesse da reciclagem deve ser analisada, caso a caso, ponderando cuidadosamente as distintas possibilidades [Azevedo e Cardoso, 2003].

3.4.3.5 Reciclagem a Semiquente em Central

A reciclagem de um pavimento é em geral mais económica que do que o reforço com uma mistura betuminosa a quente, embora existam algumas limitações com as técnicas de reciclagem existentes até ao momento [Vieira, 2003].

Tais limitações podem ser ultrapassadas recorrendo a novas técnicas, tais como reciclagem a semiquente, utilizando novas emulsões mas mantendo e incrementando bastante a economia dos custos [Vieira, 2003].

A técnica de reciclagem a semiquente em central permite reciclar os resíduos provenientes da fresagem de pavimentos, ou seja, está-se perante mais uma alternativa para aproveitamento de tais resíduos.

Esta técnica permite reciclar até 100% de material fresado, aquecendo-o a 90 °C no tambor de uma central a quente, contínua ou descontínua, para o misturar posteriormente com uma emulsão betuminosa adequada. A mistura pode ser armazenada durante 24 horas sempre que o espalhamento e compactação sejam efectuados à temperatura de 60°C ou superior a esta. O aquecimento a que foi submetido o material fresado permite que a abertura ao tráfego seja imediata, eliminando-se assim o período de cura necessário no caso da reciclagem a frio [Vieira, 2003].

A técnica de reciclagem a semiquente em central permite restituir as propriedades originais do material que se fresa e, se possível, inclusivamente melhorá-las. Estas propriedades são basicamente a capacidade estrutural ou resistência mecânica, a resistência à acção da água e a resistência à fadiga.

Esta técnica apresenta três vantagens bastante importantes [Vieira, 2003]:

1. Trabalhar a temperaturas mais baixas do que na reciclagem a quente, devido à utilização de emulsões, com a consequente economia de energia;
2. Melhoria no controle da mistura final, visto ser fabricada em central;
3. A mistura não necessita de um período de cura devido à eliminação de grande parte da água durante o processo de fabrico.

Tal como nas outras técnicas descritas anteriormente, esta também necessita de um estudo prévio do pavimento existente e de uma correcta formulação da mistura.

3.5 Conclusões

Neste capítulo, foram descritos vários métodos de reabilitação de pavimentos, o que torna difícil a escolha quando se está perante um pavimento que apresenta várias patologias.

Para se proceder à reabilitação um pavimento, torna-se necessário analisar em profundidade os problemas existentes e as suas origens de modo a realizar um diagnóstico que permita escolher qual a solução mais ajustada.

Aspectos como a disponibilidade de materiais, facilidade de execução e durabilidade dos pavimentos devem combinar-se com os dos custos dos utentes, que não-de sofrer os transtornos que se produzem durante a execução de qualquer obra de estrada [Azevedo, 2000/2001].

Por vezes, existem várias soluções para reabilitar um pavimento, no entanto, dever-se-á realizar uma análise económica, tendo em conta os valores de execução e de posterior conservação.

Aspectos como o clima e o tráfego futuro também influenciam o tipo de reabilitação a executar.

Para que a solução de reabilitação do pavimento seja implantada com sucesso e que perdure, existem vários factores a ter em consideração, como um sistema de drenagem adequado, formulação das camadas constituintes, método de construção, etc..

Depois de escolhida a solução mais adequada, o acompanhamento em obra torna-se crucial. A solução pode ser a mais indicada, no entanto, a sua má execução põe em causa a sua eficiência.

Capítulo 4

MODIFICAÇÃO DO BETUME PELA ADIÇÃO DE BORRACHA RECICLADA DE PNEUS USADOS

4.1 Introdução

O crescente aumento do número de veículos, especialmente de veículos pesados que circulam nas estradas, conjuntamente com as condições climáticas, contribui para a origem e desenvolvimento de um vasto campo de degradações. Essas degradações, quando se encontram num estado avançado de desenvolvimento, afectam directamente a condução dos utentes das estradas. Surge então a necessidade de recorrer a operações de reabilitação de modo a dotar os pavimentos com as características iniciais.

Estão patentes, no capítulo 3 desta dissertação, referências e descrições de vários métodos que permitem adaptar as reabilitações conforme as necessidades superficiais ou estruturais de cada pavimento. Na maior parte dessas reabilitações é possível recorrer à aplicação de betumes modificados, nomeadamente à aplicação de betume modificado com borracha (BMB) reciclada de pneus, para fazer face a diversos tipos de patologias, como por exemplo, a difusão e ramificação de fissuras, aumentando o período de vida útil das estradas.

Durante os últimos anos muitas pesquisas foram realizadas, no sentido de produzir misturas betuminosas mais flexíveis, menos sujeitas às variações climáticas, mais resistentes à acção do tráfego e por consequência de maior durabilidade [Júnior, 2004]. Assim, para atender a esses requisitos, foram desenvolvidos muitos modificadores de betumes, entre desses, cita-se a borracha reciclada de pneus.

Como qualquer outro modificador, pretende-se que a incorporação da borracha reciclada de pneus no betume, melhore as propriedades reológicas e físicas das misturas betuminosas, de modo a que essas apresentem uma maior resistência à temperatura de trabalho, compatibilidade com o betume base e disponibilidade no mercado com custos compatíveis, ou seja, que apresentem uma série de melhorias que se configurem numa alternativa de desempenho e economia.

Segundo a empresa americana Blacklidge Emulsions²⁹, a história de incorporar borracha reciclada de pneus ao betume, iniciou-se nos anos 40, quando a *U.S. Rubber Reclaiming Company*, introduziu no

²⁹ [Blacklidge Emulsions, 2002]

mercado um produto composto por betume e borracha não vulcanizada reciclada denominada por *RamplexTM*. Em 1963, Charles H. McDonald, engenheiro de estradas, considerado o pai do betume-borracha, efectuou uma pesquisa com o intuito de desenvolver um material altamente elástico para aplicar na manutenção de superfície de pavimentos betuminosos. As suas pesquisas resultaram no desenvolvimento de um produto composto por betume e 25% de borracha de pneus moída, misturados a 190° C, durante vinte minutos, para ser aplicado em reparação de remendos (reparações localizadas) [Júnior e Greca, 2003]. Esse produto, denominado *band-aid*, foi utilizado também como selante de fissuras e como camada de reforço. A primeira aplicação foi realizada numa rua da cidade de Phoenix, onde se constatou que após seis anos, o pavimento não apresentava fendilhamento.

Nos anos 60, em paralelo com os Estados Unidos da América, duas companhias Suecas, começaram a desenvolver uma nova mistura que continha uma percentagem de granulado de borracha reciclada de pneus como agregado, à qual foi atribuído o nome de *Rubit sem* [Martins, 2004]. Nos finais dos anos 70, esse produto foi introduzido e patenteado nos Estados Unidos com a denominação de *PlusRide sem*. Actualmente esse produto é comercializado com o nome de *EnviroTire, Inc.* [Blacklidge Emulsions, 2002].

Em meados dos anos 70, a *Arizona Refining Company, Inc.*, criou um segundo betume modificado e comercializou-o com o nome de *Arm-R-Shield sem*. Conseguiu-se assim, realizar com sucesso, revestimentos superficiais, que ficaram conhecidos como membranas de absorção de tensões (SAM), que actualmente continuam a ser aplicadas na conservação de estradas.

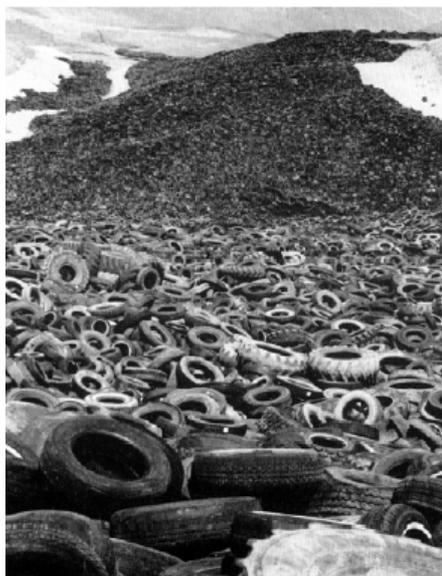
Em 1972, foi efectuada a primeira membrana de interface de absorção de tensões (SAMI). Tratava-se de uma camada de revestimento em BMB, aplicada entre camadas de misturas betuminosas para retardar as fissuras de reflexão. Estas membranas ainda são aplicadas na reabilitação de pavimentos.

Nos anos 80, as companhias que comercializavam os dois produtos, fundaram uma associação comercial conhecida por *Asphalt Rubber Producers Group*. Foi a partir dessa década, que a adição de borracha reciclada de pneus nas misturas betuminosas passou a ser considerada como uma óptima alternativa para diminuir os problemas ambientais causados pela disposição de resíduos sólidos.

As modificações e o melhoramento das misturas betuminosas com o betume modificado com borracha nos Estados Unidos da América, principalmente nos estados do Arizona, da Califórnia e da Florida, têm sido galopantes, devido a esse tipo de misturas ter superado os desempenhos inicialmente atribuídos a esse material quer, em termos da comparação dos custos (de construção e de manutenção) quer mesmo a nível do seu comportamento estrutural e funcional, mesmo em climas muito severos, nos quais se observa o fenómeno de fadiga térmica.

Tal como em qualquer produto, os resultados das experiências produziram aperfeiçoamentos na técnica de fabrico e nas características do BMB, levando que na última década surgisse a Norma Americana ASTM D 6114 que define e caracteriza o BMB.

Paralelamente, tornou-se notório o crescente interesse ambiental, especificamente relacionado com a utilização de materiais recicláveis, nomeadamente os resíduos de pneus (Figura 4.1).

Figura 4.1 – Resíduos de pneus³⁰

Como se pode verificar no Quadro 4.1, todos os anos são produzidas cerca de 2.542.640 toneladas de pneus usados em vários países da União Europeia. Os resíduos de pneus, constituem não só na Europa, mas em todo o mundo um desafio muito difícil, dadas as suas peculiaridades de durabilidade (cerca de 600 anos), quantidade, volume e peso, e principalmente grande dificuldade de lhes proporcionar um destino ecológico e economicamente viável.

Country	Used Tyres	Population
Netherlands	65.000	15.492.800
Belgium	70.000	10.143.000
Spain	330.000	39.241.900
England	400.000	58.684.000
Italy	360.000	57.330.500
Austria	41.000	8.045.800
Greece	58.500	10.474.600
Portugal	45.000	9.920.800
France	380.000	58.625.400
Sweden	65.000	8.737.500
Gernany	650.000	81.845.000
Total	2.542.640	372.552.900

Quadro 4.1 – Acumulação anual de pneus usados nos países da União Europeia³¹

Muitos são os destinos dos resíduos de pneus, mas o mais comum é serem depositados em aterros sanitários ou colocados em terrenos baldios a céu aberto [Júnior e Greca, 2003]. A disposição de pneus em aterros sanitários é problemática, pois os pneus dificultam a compactação, reduzindo

³⁰ Fonte: [Oda e Júnior, 2001]

³¹ Fonte: Adaptado de [Vieira, 2005]

significativamente a vida útil dos aterros [Oda e Júnior, 2001]. Quando abandonados em locais inadequados, os pneus servem como local de procriação de mosquitos e outros vectores de doenças e representam um risco constante de incêndio (Figura 4.2), que contamina o ar com um fumo altamente tóxico (contendo dióxido de enxofre) e deixa um óleo que se infiltra, contaminando o lençol freático.



Figura 4.2 – Desastre ecológico – incêndio de pneus³²

Assim, a sua recuperação e reutilização (Figura 4.3), permite reduzir significativamente o uso de novas matérias-primas contribuindo para minimizar parte dos impactes económicos e ambientais negativos.

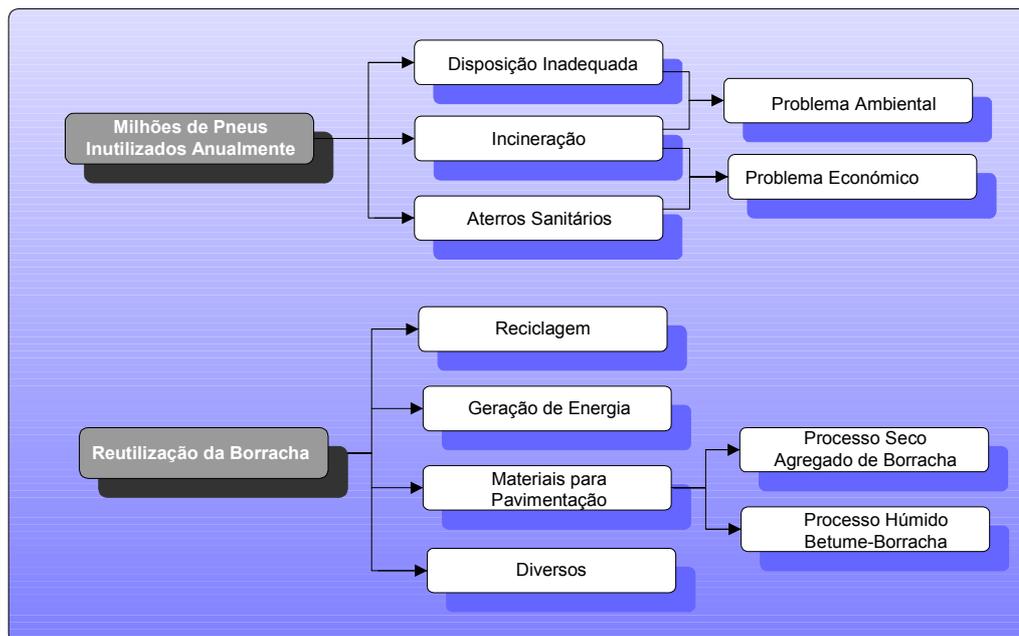


Figura 4.3 – Alternativas para reutilização de pneus³³

Pode considerar-se que o destino mais adequado em termos ecológicos e ambientalmente correcto é aquele que possa gerar um produto comercializável e útil para a sociedade. Um dos usos mais nobres para os resíduos provenientes da borracha de pneu é a sua incorporação no betume, criando um novo tipo de betume para a pavimentação. A borracha de pneus reciclados introduzida no betume, não é um

³² Fonte: [Oda e Júnior, 2001]

³³ Adaptado de [Oda e Júnior, 2001]

produto a mais, inerte, colocado apenas para recheiar, na realidade a borracha é um grande modificador, de certas propriedades, reconhecido mundialmente [Júnior e Greca, 2003].

A aplicação de misturas betuminosas com BMB está a aumentar tanto em Portugal como em outros países, devido ao êxito dos resultados obtidos em anteriores utilizações, no Arizona (Estado Americano), na África do Sul e na Austrália onde já existe uma vasta experiência na aplicação deste tipo de misturas [Sabita, 1997].

Na Europa e em Portugal, a empresa RECIPAV foi pioneira na aplicação de misturas com BMB segundo a Norma Americana ASTM D 6114. Segundo a RECIPAV³⁴, foram aplicadas cerca de 37.000 toneladas de betume modificado com borracha, o que equivale a mais de 430.000 toneladas de misturas betuminosas utilizadas, essencialmente na reabilitação de pavimento, desde 1999 até 2004. As empresas CEPSA, GALP, LUSASFAL e REPSOL, também produzem e aplicam misturas com BMB no nosso país, segundo as especificações para betumes modificados com polímeros.

As 5 empresas referidas anteriormente, fabricam o BMB, no entanto, cada uma apresenta produtos diferentes com aplicações diferentes, chegando mesmo a diferenciarem-se no modo de fabrico de obtenção do BMB.

A utilização do BMB, em Portugal, tem sido acompanhada pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), pela EP – Estradas de Portugal, E.P.E. e por várias Universidades, tendo estas instituições elaborado relatórios sobre as propriedades do produto e sobre o acompanhamento das obras já realizadas.

Segundo Rodrigues³⁵, as medidas a adoptar pela EP – Estradas de Portugal, E.P.E., serão:

1. Curto prazo
 - Continuar a prática ponderada de integrar o BMB;
 - Definir requisitos para os BMB, tanto para os estáveis como para os não estáveis ao armazenamento como para as respectivas misturas betuminosas correspondentes.
2. Curto prazo/Médio prazo
 - Continuar com protocolos com o LNEC e com as Universidades, com a colaboração das empresas interessadas na definição e confirmação de requisitos a exigir, tendo em vista a revisão do caderno de encargos;
 - Preparar circular sobre as vantagens de utilização destes produtos.

O LNEC tem estado envolvido no acompanhamento de algumas obras, sendo que os estudos levados a cabo no decurso das obras, compreenderam entre outras, as seguintes actividades [Batista, 2004]:

- Análise das práticas utilizadas noutros países relativamente às técnicas estudadas;
- Realização de estudos laboratoriais para a caracterização dos materiais empregues em obra;
- Apoio às equipas responsáveis pelo respectivo controlo de quantidade;

³⁴ [Recipav, 2005]

³⁵ [Rodrigues, 2005]

- Realização de estudos laboratoriais para a caracterização das misturas;
- Inspeção visual dos pavimentos;
- Caracterização estrutural dos pavimentos antes e após reabilitação;
- Colaboração no estabelecimento de especificações;
- Colaboração no estabelecimento do sistema de gestão da qualidade.

O acompanhamento de várias entidades nacionais no fabrico e aplicação de misturas com BMB visa contribuir para o estabelecimento de especificações relativas a esse tipo de misturas betuminosas devidamente adaptadas às condições portuguesas.

4.2 O Betume Modificado com Borracha

O betume modificado com borracha (BMB) ou *Crumb Rubber Modified* (CRM), na terminologia americana, consiste na transformação de um betume adicionando pó de borracha processada de pneus reciclados.

O BMB, trata-se de um fluído espesso e viscoso, preparado em reactores especiais, que surge após uma adequada e controlada reacção de “digestão” entre a borracha e o betume, em determinadas condições operatórias de processo (tempo, temperatura, agitação) [Pampulim, 2005].

A modificação do betume através da incorporação da borracha de pneus reciclados tem como objectivo melhorar as seguintes características mecânicas:

1. Maior flexibilidade e elasticidade;
2. Melhor comportamento e resistência à fadiga;
3. Melhor comportamento à deformação plástica;
4. Diminuição da susceptibilidade térmica a altas temperaturas;
5. Aumento da adesividade entre agregado-ligante;
6. Aumento da coesão interna;
7. Aumento da resistência ao envelhecimento.

Modificando os betumes com a adição da borracha, consegue-se obter propriedades reológicas não obtidas com betumes convencionais [Botasso *et al.*, 2003]. A adição desse componente (borracha reciclada de pneus) atribui à mistura uma grande flexibilidade, com capacidade de absorver a reflexão de fendas, resistentes a uma grande variedade de condições estruturais e com maior durabilidade [Anderson *et al.*, 2000]. Ou seja, o melhoramento do betume obtido com adição de borracha de pneus, pode ser considerado como uma alternativa atraente, já que o resultado final é uma mistura betuminosa com características técnicas superiores às verificadas em misturas betuminosas convencionais.

A borracha parte constituinte dos pneus reciclados possui excelentes propriedades físico-químicas para ser incorporada em ligantes convencionais, obtendo-se assim uma série de melhorias que se reflectem directamente na durabilidade do pavimento.

De um ponto de vista físico-químico, ao adicionar borracha de pneu reciclada ao betume de base natural, esta reage, absorvendo e fixando a fracção malténica própria dos constituintes voláteis e aromáticos do betume. Assim, dá-se um aumento sensível do volume individual das partículas de borracha quando essas absorvem os componentes específicos do betume (maltenos), resultando esse acréscimo de volume num acréscimo de viscosidade da mistura [Pampulim, 2005].

Há também a “dissolução” das partículas de borracha pelo betume, pelos ácidos carboxílicos presentes no betume. É a borracha que se comporta como coloidal (dissolvida nos maltenos absorvidos) que confere as propriedades de interesse ao ligante, impedindo que os maltenos se percam do betume [Pampulim, 2005].

A fixação dos maltenos permite obter um aumento significativo da resistência ao envelhecimento das misturas betuminosas, uma vez que os constituintes do betume vão-se perdendo no tempo devido a fenómenos de oxidação e por acção dos raios ultra-violeta [Montepara e Giuliani, 1999]. Esta pode ser uma das grandes vantagens em relação aos ligantes betuminosos convencionais [Júnior, 2004].

É importante mencionar o problema entre o tipo de agente modificador (borracha moída de pneu) e o ligante convencional. Para conseguir que o BMB adquira certas propriedades, é necessário que o agente modificador (borracha moída de pneu) seja compatível com o betume base e é neste ponto fundamental que reside o segredo de uma modificação de qualidade [Júnior, 2004]. Essa compatibilidade é um factor determinante durante o transporte, armazenamento e aplicação do produto. Existem diversos factores que determinam a forma de incorporação da borracha para obter distribuições estáveis [Botasso *et al.*, 2003]: tipo de borracha, tamanho das partículas de borracha, tipo de betume, agentes aromáticos e energia da mistura, temperatura e tempo.

4.2.1 Características da Borracha

A borracha utilizada no BMB pode ser proveniente de pneus de automóveis ou de camiões. Geralmente, os pneus de automóveis são compostos de 16 a 20% de borracha natural e 26 a 31% de borracha sintética, enquanto que os pneus dos camiões são compostos por cerca de 31 a 33% de borracha natural e de 16 a 21% de borracha sintética [Goodyear, 1999].

O produto gerado dos pneus (pó de borracha ou granulado de borracha) apresenta alta homogeneidade e mantém muitas das propriedades físicas da composição original.

A borracha utilizada é composta por moléculas polares, que no modelo molecular dos betumes formam a estrutura que fornece as propriedades elásticas e que são envolvidas pelas moléculas apolares, que contribuem para as propriedades viscosas [Asphalt Institute, 1995].

A adição do granulado de borracha reciclada no betume, incrementa consideravelmente a sua viscosidade e esta afecta as temperaturas de trabalho tanto no fabrico, como na aplicação e compactação da mistura [Asefma, 2005].

A compatibilidade entre o betume-borracha é fundamental, pois se esta ligação não funcionar, a borracha fica apenas em suspensão no betume, não se dissolvendo, ou não aumentando de volume por absorção de certos componentes característicos do betume, ou seja não realiza a sua função de modificadora do betume.

O granulado de borracha utilizado foi sendo sucessivamente modificado em termos de granulometria e forma das partículas com o intuito de se obter um melhor produto final e, em simultâneo, de o adequar à realidade dos equipamentos para a produção do BMB [Fonseca, 2004].

Assim, a granulometria (Figura 4.4 e Figura 4.5) da borracha pode variar com o processo de produção principalmente em função dos equipamentos e da temperatura de moagem [Heiztman, 1992].



Figura 4.4 – Partículas de borracha com dimensões entre os 0 e os 4 mm³⁶



Figura 4.5 – Partículas de borracha com dimensões entre os 15 e os 20 mm³⁷

Existem importantes diferenças na qualidade do produto final dependendo dos tempos de reacção necessários e dependendo do método escolhido para a obtenção da borracha [Asefma, 2005].

Existem dois métodos que permitem obter o granulado de borracha: moagem/trituração ambiental e criogénica. O granulado de borracha obtido através da trituração ambiental apresenta maiores dimensões, ou seja, apresentam uma maior superfície específica do que o granulado obtido através da trituração criogénica. Estes dois processos, serão descritos posteriormente no ponto 4.2.3 (Fabrico do Betume Modificado com Borracha) deste mesmo capítulo.

Do ponto de vista do seu tamanho, comprovou-se que um tamanho de partículas finas (< 0,4 mm), procedente da trituração criogénica, requer um menor tempo de reacção e menor temperatura da mistura, no entanto apresenta custos mais elevados de produção, devido à utilização de nitrogénio. As partículas mais grossas (0,8 mm), provenientes da trituração ambiental, são mais económicas a nível de produção, mas requerem um maior consumo de tempo e energia de modificação [Asefma, 2005].

³⁶ Fonte: [mini-waste]

³⁷ Fonte: [mini-waste]

Estas partículas maiores, como apresentam uma maior superfície específica tornam-se também mais reactivas com o betume [Soto e Victoria, 2005].

Quaisquer que sejam os processos de obtenção do granulado de borracha, esta não sofre nenhuma modificação, nem é separada dos demais compostos, devido a esta estar na forma vulcanizada [Martins, 2004].

Como se trata de borracha vulcanizada, a sua dispersão no betume é difícil, pelo que se deve recorrer a temperaturas elevadas. Existem fabricantes, que para que facilitem a dispersão da borracha no betume recorrem a produtos que proporcionem compatibilização, como óleos compatibilizadores (aromáticos) e até mesmo a catalizadores que activem a despolimerização oxidativa da borracha.

A utilização desses catalisadores deve ser evitada, pois são extremamente caros e podem prejudicar o betume. O emprego destes produtos no fabrico de betumes modificados com borracha de pneus, permite reduzir os tempos e a energia de fabrico, conseguindo-se aumentar a capacidade de produção [Soto e Victoria, 2005].

Em Portugal, só se obtém a borracha pelo processo criogénico, ou seja, a empresas que pretendam modificar o betume com borracha obtida através do processo ambiental terá que importá-la.

Para o fabrico de betume com borracha de pneu são utilizados betumes base especialmente seleccionados, por forma assegurar uma perfeita compatibilidade com a borracha reciclada de pneus incorporada.

No fabrico de um betume modificado deve-se analisar profundamente o betume base que irá ser modificado, pois nem todos os betumes base produzem para o mesmo tipo de borracha, a mesma evolução no tempo de viscosidade.

O betume deve conter a percentagem de maltenos necessários para reagir com a borracha, porque os betumes com maiores percentagens de maltenos tendem a reagir mais rapidamente com a borracha.

Um parâmetro importante na compatibilidade do sistema betume-borracha é a aromaticidade do betume, sendo o teor em aromáticos, um componente preponderante dos maltenos. Outro aspecto importante é a acidez do betume, que deve ser média [Pampulim, 2005].

Até à data, foram estudados vários tipos de betume, bem como várias origens, o que permite conhecer com alguma fiabilidade os tempos de reacção para cada tipo de betume base utilizado. Contudo, cada adição de borracha é caracterizada laboratorialmente, para que eventuais alterações físico-reológicas deste betume base sejam monitorizadas e consideradas durante o processo de fabrico, visando adicionar outros componentes que promovam a completa compatibilidade entre o betume base e o granulado de borracha de pneus reciclados.

4.2.2 Propriedades do Betume Modificado com Borracha

Um betume modificado difere de um betume base que lhe deu origem, em termos das suas propriedades físicas e reológicas e em termos da sua composição química. A modificação do betume só ocorre efectivamente quando a alteração de propriedades é originada numa reacção química entre o ligante betuminoso e o agente modificador.

Segundo Amaral³⁸, a adição de borracha reciclada de pneus no betume modifica as seguintes propriedades:

- **Susceptibilidade térmica**

Esta propriedade consiste na variação da consistência, em função da temperatura.

A incorporação da borracha tem geralmente como objectivo a redução dessa susceptibilidade, ampliando a faixa que separa a fragilidade a frio do amolecimento a quente. Em climas frios, o ligante permanece mais flexível e aumenta a resistência da mistura betuminosa à fissuração. Em climas quentes, o maior ponto de amolecimento e a maior viscosidade do ligante aumentam a resistência à deformação permanente, traduzidas por rodeiras.

- **Coesão**

A coesão é definida como a energia necessária para destruir uma película de ligante. Varia em função da temperatura, passando por um máximo. A finalidade da modificação com o polímero ou com a borracha reciclada de pneus é o aumento da coesão e/ou faixa de coesão, ou seja, os betumes modificados passam a ter maior capacidade de manter os agregados da mistura unidos, conseguindo assim, uma consistência satisfatória em toda as faixas de temperaturas.

Para existir coesão, o ligante necessita de viscosidade elevada, para envolver os agregados e evitar os efeitos de envelhecimento e melhorar a resistência à acção da água.

- **Elasticidade**

Esta propriedade define-se como a deformação causada sob efeito do tráfego e das variações de temperatura. A elasticidade é a aptidão para suportar essa deformação de modo reversível sem fendilhar. A finalidade da incorporação da borracha é de acentuar a elasticidade e mantê-la na faixa mais ampla das temperaturas de utilização.

A maior recuperação elástica do betume modificado mantém a integridade da mistura betuminosa, mesmo quando sujeita a níveis elevados de deformação, ao contrário do comportamento puramente dúctil das misturas betuminosas convencionais [Júnior, 2004].

- **Resistência à fadiga**

Trata-se da propriedade que os materiais têm para resistir quando solicitados de forma repetida, consumindo progressivamente a sua capacidade de resistência. A adição de borracha visa aumentar essa capacidade sobretudo a baixas temperaturas.

- **Resistência ao envelhecimento**

A colocação de borracha no betume quente, faz com que esta reaja, absorvendo e fixando os maltenos constituintes da fracção volátil e aromática do betume. A fixação desses, permite que a mistura betuminosa não perca a capacidade de flectir até à rotura, obtendo assim um

³⁸ [Amaral, 2000]

significativo aumento da resistência ao envelhecimento, contribuindo directamente para uma durabilidade maior do pavimento.

A maior viscosidade do ligante modificado incrementa uma espessura de película sobre o agregado, esta característica também protege a mistura betuminosa do envelhecimento acelerado.

- **Poder de adesão**

Os BMB também aumentam a resistência da película do betume ao descolamento da superfície do agregado, principalmente pela acção da água.

4.2.3 Mecanismo do Betume Modificado com Borracha

O mecanismo do betume convencional numa mistura betuminosa aplicada num pavimento flexível, processa-se da seguinte maneira [Amaral, 2000]: O betume liquefeito envolve as partículas dos agregados, formando uma película que ao arrefecer, após a compactação, volta a ter um comportamento elasto-plástico.

Quando o pavimento é solicitado, e sofre deflexão, há uma compressão do esqueleto mineral que aumenta o atrito interno da camada, que reage à aplicação da carga. Este processo origina no betume, por um lado, tensões elevadas de tracção na face inferior da camada onde a mistura betuminosa está colocada e por outro, tensões de compressão, na face superior, que conseqüentemente promove o deslocamento de micelas. Após retirada a carga, dá-se a distensão do esqueleto mineral comprimido, o que obriga a camada a sofrer um fluxo plástico contrário ao sofrido aquando a aplicação da carga.

No fluxo plástico oposto, as micelas não retornam à sua posição inicial, permitindo assim, uma deformação residual permanente.

Com a sucessão de solicitações de cargas, o deslocamento das micelas também é sucessivo, enfraquecendo o ligante. Esse enfraquecimento suscita uma diminuição da resistência à próxima aplicação da carga, o que gera deflexões maiores. A repetição deste ciclo promove a fissuração interna do pavimento betuminoso até atingir a superfície.

A deformabilidade do pavimento e o seu deslocamento residual não é sempre o mesmo, ele é função do tipo de betume, da sua susceptibilidade térmica e da temperatura do ar e do pavimento no período de ocorrência [Dner,1998].

O betume modificado, em especial com borracha reciclada de pneus, aumenta a probabilidade de retorno dessas micelas à sua posição original, acarretando uma maior vida útil do pavimento, devido ao facto da borracha envolver o betume num sistema de molas e estas ao serem esticadas oferecem uma maior resistência à deformação e quando terminada a acção das cargas o retorno das micelas à sua posição original é favorecido [Amaral, 2000].

Segundo Martinho³⁹, os betumes modificados com borracha, quando em altas temperaturas, superiores ao seu ponto de fusão, comportam-se como plásticos, podendo ser moldados, e após a sua fusão, quando arrefece são devolvidas as suas propriedades elásticas.

Conclui-se que essas melhorias nas propriedades do betume contribuem para um aumento da resistência às deformações permanentes traduzidas pelos cavados de rodeira e às fissuras, nas altas e baixas temperaturas respectivamente.

4.3 Fabrico do Betume Modificado com Borracha

O processo de fabrico do BMB inicia-se com a reciclagem de resíduos de pneus, de modo a obter diferentes dimensões de granulado de borracha a incorporar em misturas betuminosas.

O peso aproximado de um pneu de um veículo ligeiro é cerca de 9,54 kg, dos quais metade é sobretudo borrachas naturais e/ou sintéticas. Com todas essas características os pneus podem ser reciclados de modo a permitir a sua incorporação nos betumes melhorando a sua performance.

Segundo a Quercus⁴⁰ além de pneus de veículos ligeiros e pesados, que são actualmente reciclados, existem outros tipos de pneus para reciclar, como os pneus de tractor ou os pneus de máquinas agrícolas. A sua reciclagem é mais complicada, principalmente devido às suas grandes dimensões ou à espessura dos seus fios de aço.

O processo de reciclagem de resíduos de pneus é executado mediante os seguintes procedimentos [Recipneu, 2005]:

1. Os pneus quando recepcionados, são separados por lotes;
2. Extração do aro metálico dos pneus de maior dimensão (camiões, autocarros, etc.);
3. Antes da trituração/moagem da borracha, é realizada uma relação entre o número de pneus de veículos ligeiros com pneus de veículos pesados, para assegurar as propriedades físico-químicas do granulado de borracha, requeridas pelas suas futuras aplicações;
4. De seguida, passa-se à trituração/moagem da borracha, que pode ser executada mediante dois processos:
 - Ambiental – Através de processos mecânicos, corta-se a borracha em tiras à temperatura ambiente. A borracha assim obtida é sujeita a um processo de moagem final com recurso a moinhos de alta potência [Nunes, 2005]. Através deste processo de trituração obtém-se partículas com dimensões na ordem dos 0,8 mm.
 - Criogénico – Antes de entrar neste sistema, os pneus são triturados em fragmentos com uma dimensão média de 2,25 cm para posteriormente poderem entrar no sistema criogénico primário (Figura 4.6). Os fragmentos de pneu entram num processo criogénico (nitrogénio líquido), solidificando-se como o vidro (arrefecimento criogénico), desenvolvendo um comportamento quebradiço, que após passagem por moinhos de

³⁹ [Martinho *et al.*, 1994]

⁴⁰ [Quercus, 2005]

martelos especiais com alta energia de impacto, estilhaçam a borracha em inúmeras partículas de pequenas, finas e ultra finas dimensões (< 0,4 mm).



Figura 4.6 – Túnel criogénico⁴¹

5. Operação de peneiração, o arame (por íman) e o têxtil (por sucção) são separados da borracha.
6. Secagem da borracha;
7. Os pedaços mais pequenos de borracha são depois classificados por dimensões, armazenados em silos e depois ensacados.

Após a obtenção da borracha, o processo prossegue segundo três métodos de fabrico de betumes modificados com borracha: via húmida, via seca e via mista.

Embora existam 3 métodos de fabrico que permitem obter o BMB, os métodos por via húmida e por via seca são os mais utilizados.

Em Portugal, para modificar o betume com borracha reciclada de pneus, as empresas recorrem ao método via húmida.

- **Via Húmida**

No método de fabrico por via húmida ou *wet process*, na terminologia americana, a borracha moída de pneus é incorporada no ligante betuminoso, para agir como modificador do betume, ou seja, para alterar a reologia do betume base.

A modificação do betume por via húmida permite a obtenção de betumes modificados com borracha de maior viscosidade relativamente a outros betumes modificados que também permitem a fabricação de misturas, com dotações de betume mais altas e, portanto, de maior durabilidade [Nunes, 2005].

O fabrico do betume modificado com borracha reciclada de pneus por via húmida compreende duas fases, a primeira da adição de certas quantidades de um determinado tipo de granulado de borracha ao betume base, e a segunda, de interacção com o betume base, a que se chama correntemente fase de “digestão” [Batista, 2004].

O betume é modificado adicionando-lhe 5 a 25% do peso total do ligante, a uma temperatura elevada (150 a 200°C), durante um determinado período de tempo (12 a 45 min). Com estas e

⁴¹ Fonte: [Recipneu, 2005]

outras condições operatórias específicas dá-se a já referida fase de digestão, em que se forma um fluido espesso e viscoso denominado por *asphalt-rubber*, na terminologia americana ou betume-borracha, na terminologia portuguesa, com propriedades reológicas diferentes do betume original, podendo em alguns casos incorporar-se aditivos para ajustar a viscosidade da mistura (diluentes) [Oda e Júnior, 2001].

Da adição da borracha ao betume resulta num sistema de três componentes: betume, “gel” e borracha (Figura 4.7).

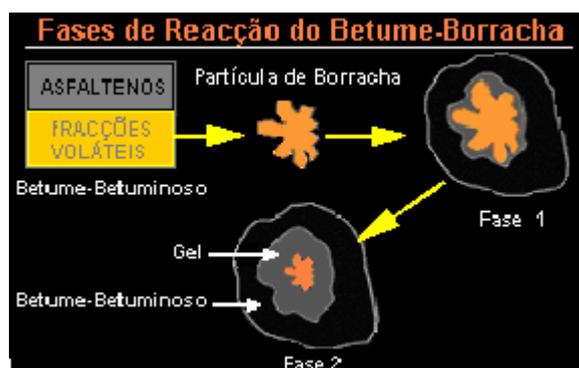


Figura 4.7 – Fases de reacção do betume-borracha⁴²

O denominado “gel”, consiste na reacção química de parte da borracha com os maltenos do betume. A formação deste gel, que depende de vários factores, é responsável pela viscosidade que o produto final apresenta. A viscosidade a temperaturas elevadas permite a redução de deformações permanentes, aumentando a rigidez.

Em função da formulação do BMB, conseguem-se ou não betumes estáveis ao armazenamento, com características tais que permitem fabricar misturas com maiores teores de ligante, que permitem reduzir a espessura das camadas [Soto e Victoria, 2005].

O método por via húmida pode-se dividir em duas vertentes de fabrico:

1. **BMB produzido em obra (*in situ*)**

O fabrico de misturas betuminosas com betume-borracha é realizado no mesmo tipo de centrais “fixas” que as utilizadas para o fabrico das misturas betuminosas a quente, sendo necessário complementar o processo de fabrico tradicional com a incorporação de algumas operações adicionais, uma vez que o processo de modificação do betume por acção da borracha é realizado em obra [Baptista, 2004].

Como a modificação do betume se realiza junto das centrais de fabrico de misturas betuminosas convencionais, torna-se necessário agregar um equipamento móvel específico (Figura 4.8).

⁴² Adaptado de [Vieira, 2005]

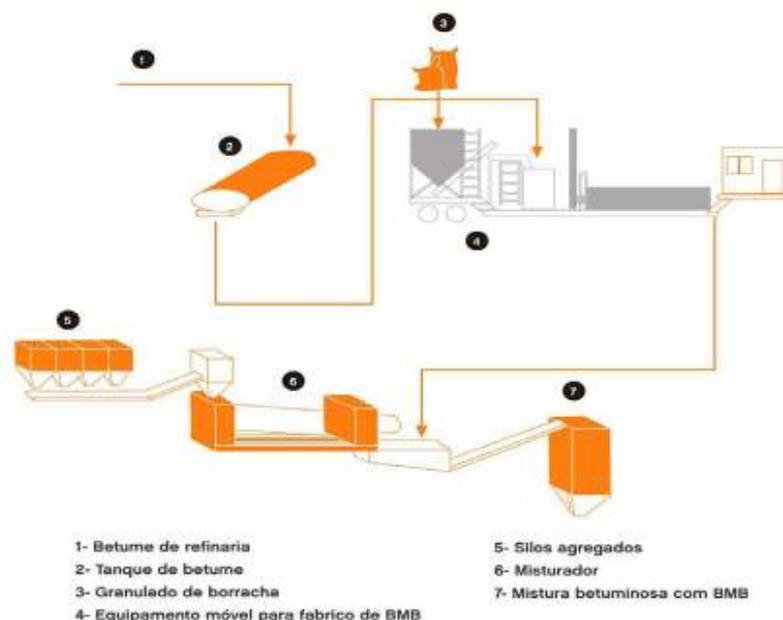


Figura 4.8 – Esquema do fabrico de BMB, por via húmida – produção em obra ⁴³

A sua instalação na central de fabrico de misturas betuminosas de apoio é efectuada entre o tanque de armazenamento do betume base e o misturador da central, num princípio *by pass*. Esse equipamento aquece a mistura do betume original com a borracha, permitindo uma reacção química/física entre esses dois materiais [Batista, 2005]. Essa reacção dá-se com uma agitação lenta, de modo a que a borracha absorva lentamente os maltenos do betume e se expanda. A agitação contínua torna-se necessária para manter as partículas da borracha dispersas no betume. Caso não exista agitação, as partículas tendem a depositar-se no fundo do tanque.

Neste processo de modificação do betume, a dosagem, a granulometria, as condições da mistura e reacção devem ser devidamente estudadas e controladas. A dosificação é fundamental, pois a adequada proporção de cada componente resulta num betume com melhores desempenhos.

A temperatura é fundamental para o sucesso da mistura. Um betume-borracha que seja misturado a uma temperatura incorrecta nunca alcançará as características obtidas em laboratório. Por outro lado, se as temperaturas forem demasiado baixas, o tempo de reacção torna-se mais longo e não se consegue obter o betume modificado com borracha com as características desejadas. Por exemplo, se a temperatura do betume desce 10 °C, é necessário o dobro do tempo para que a borracha se disperse, se misture e reaja com o betume [Soto e Victoria, 2005].

As temperaturas necessárias para o aquecimento do betume, dependem do tipo de equipamento de fabrico, mas geralmente estão compreendidas entre os 165 °C e os 190 °C. As temperaturas não devem ultrapassar os 200 °C, devido ao facto de produzirem

⁴³ Fonte: [Fonseca, 2004]

emissões nocivas. Para que o controlo da temperatura seja eficaz, diversos equipamentos, como o misturador, devem estar dotados de termómetros visíveis [Soto e Victoria, 2005].

O tempo de reacção depende também do sistema de fabrico e pode variar entre 15 a 45 minutos, antes da incorporação do agregado fino, grosso e filer. Durante esse período de reacção, o betume modificado deve ser mantido em agitação no tanque de reacção. Essa agitação deverá ser produzida por um eixo horizontal com um número adequado de pás [Soto e Victoria, 2005].

O BMB produzido na central betuminosa é fabricado com um alto teor de borracha, que resulta num produto dotado de uma grande viscosidade que resulta numa instabilidade relativamente ao armazenamento. A borracha incorporada neste processo de fabrico apresenta dimensões máximas de 2 mm [Medina e Granados, 2003].

O tempo máximo de armazenamento do BMB fabricado *in situ*, a temperaturas iguais ou superiores a 160 °C será de 4 horas, a partir desse tempo de armazenamento a temperatura decresce cerca de 30°C. Para a sua reutilização, deverá o betume modificado ser novamente aquecido para temperaturas de fornecimento situadas entre 160° C e 190° C. Estes ciclos de arrefecimento/aquecimento, na maioria das especificações estão limitados apenas a dois [Soto e Victoria, 2005].

Em Portugal, a empresa RECIPAV, modifica o betume segundo este processo, seguindo os procedimentos da norma Americana ASTM D 6114, incorporando percentagens de granulado de borracha (obtida através da trituração criogénica) da ordem dos 22% de borracha sobre o peso total do ligante [Fonseca, 2004].

A viscosidade que o produto apresenta cerca de 15 a 20% vezes superior aos betumes convencionais, permite garantir o funcionamento das misturas betuminosas a altas temperaturas, bem como, elimina o problema da segregação do ligante durante o transporte no caso de misturas abertas [RECIPAV, 2005].

A elevada viscosidade permite ainda a incorporação de altas percentagens deste tipo de ligante nas misturas betuminosas (8 a 10%) sem que essas misturas apresentem deformações superiores às misturas convencionais [RECIPAV, 2005]. Existe a possibilidade de adicionar mais ligante sem problemas de rodeiras, oferecendo mais durabilidade ao pavimento [Moura e Pamplona, 2005].

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

Betumes produzidos por via húmida, *in situ*, têm características próprias e conseqüentemente específicas aplicações, que serão descritas no ponto 4.4 (Tipos de Misturas com BMB e as suas Aplicações), desta dissertação. Contudo, um betume modificado com altas percentagens de borracha reciclada de pneus caracteriza-se por uma pequena susceptibilidade térmica, com um ponto de amolecimento e viscosidades elevadas.

2. **BMB produzido em fábrica/refinaria**

O fabrico de betumes modificados em fábrica e/ou refinaria com borracha reciclada de pneus segue os mesmos procedimentos de fabrico que os betumes modificados com polímeros (BMP), destacando-se a excelente adesividade aos agregados e a elevada resistência ao envelhecimento [Moura e Pamplona, 2005]. A produção de BMB efectuada em fábrica, permite garantir um rigoroso controlo de todo o processo produtivo, bem como, a qualidade do produto final [Nunes, 2005].

De forma a conseguir a estabilidade da mistura existem fabricantes que em certas ocasiões recorrem a compatibilizantes e aditivos [Soto e Victoria, 2005].

Os produtos obtidos são mais homogéneos que os fabricados *in situ*, devido às específicas unidades de fabrico do betume modificado, que conseguem uma dispersão energética das partículas de borracha no betume. No entanto, as percentagens de granulado de borracha de pneus reciclados admissíveis para conseguir betumes estáveis ao armazenamento e manuseáveis nas centrais betuminosas, são menores em relação às percentagens utilizadas no processo de fabrico *in situ* [Soto e Victoria, 2005].

É de referir que a borracha procedente dos pneus encontra-se vulcanizada e por isso a digestão torna-se mais difícil. No entanto, este problema é atenuado ao incorporar granulado de borracha de pequenas dimensões, abaixo de 0,5 mm [Medina e Muñoz, 2004].

Estes BMB's podem ser fabricados com viscosidades que permitem a sua utilização dentro do exigido nas normas europeias no que diz respeito à temperatura de fabrico (entre 180 e 185 °C), com emissões de gases similares aos BMP. Estes BMB's apresentam excelentes propriedades de resistência às deformações plásticas e dinâmicas [Seixas, 2005].

O BMB obtido através do método por via húmida produzido em fábrica, não contém tanta percentagem de borracha e conseqüentemente a viscosidade do produto é diminuta comparativamente ao BMB produzido *in situ*, segundo Potti⁴⁴. BMB com viscosidades muito altas, dificulta de uma maneira extraordinária as operações de logística com este tipo de betumes, especialmente em épocas frias. A solução para este problema passa por fabricar a mistura em fábrica [Potti, 2004].

CEPSA, GALP, LUSASFAL e REPSOL, como fabricantes de betumes modificados e emulsões, têm desenvolvido distintos tipos de betumes modificados com borracha obtida da trituração de pneus reciclados. Em todos os casos, obtiveram betumes modificados com borracha estáveis ao armazenamento e homogéneos.

A estabilidade ao armazenamento constitui uma das vantagens mais importantes, uma vez que permite a trabalhabilidade das misturas betuminosas durante o tempo necessário para a execução dos trabalhos de pavimentação. Por outro lado, garante um efectivo controlo

⁴⁴ [Potti, 2004]

da qualidade uma vez que é produzido e ensaiado em fábrica/refinaria [Moura e Pamplona, 2005].

A juntar a estes aspectos, menciona-se outro não menos importante, como a facilidade em termos logísticos, uma vez que, ao chegar à central de misturas betuminosas, necessita apenas de um reservatório específico, tal como nos betumes modificados de uso corrente. Não são portanto necessários meios adicionais para o trabalho com este produto que torna numa solução economicamente vantajosa [Moura e Pamplona, 2005]. Segundo Júnior⁴⁵, este sistema de produção de BMB comparado com o outro sistema produção (*in situ*), permite uma economia de tempo e de custos já que o betume betuminoso modificado é produzido e transportado para várias obras ao mesmo tempo, enquanto que no instável, cada obra deve possuir um equipamento de fabrico de BMB.

O processo de fabrico do BMB realizado em fábrica (Figura 4.9), posteriormente é transportado em cisternas e armazenado durante dias. Apresenta características semelhantes e condições de trabalhabilidade idênticas aos betumes modificados com polímeros [Potti, 2004].



Figura 4.9 – Fabrico de BMB, por via húmida – produção em fábrica ⁴⁶

- **Processo por Via Seca**

Em Portugal este processo de fabrico não se utiliza, contudo em vários países como a Alemanha, Polónia, Holanda, Itália e Espanha, trata-se de um processo muito utilizado.

Nos últimos tempos, especialmente em Espanha, este processo de fabrico tem caído em desuso, dando-se ênfase ao fabrico de BMB por via húmida.

Normalmente o fabrico de misturas betuminosas por via seca, em Espanha, realizam-se em centrais descontínuas, contudo, existem países que fabricam o BMB, por via seca, em centrais contínuas [Soto e Victoria, 2005].

No processo de fabrico por via seca ou *dry process*, na terminologia americana (Figura 4.10), a borracha de pneus é misturada com o agregado antes de se adicionar o ligante betuminoso.

⁴⁵ [Junior, 2004]

⁴⁶ Fonte: Fotografia cedida pela LUSASFAL

Neste processo, o granulado de borracha reciclada, substitui parte da fracção fina da mistura, com dimensões inferiores a 0,5 mm, substituindo uma parte dos materiais pétreos, ou seja entra como filer [Potti, 2004].

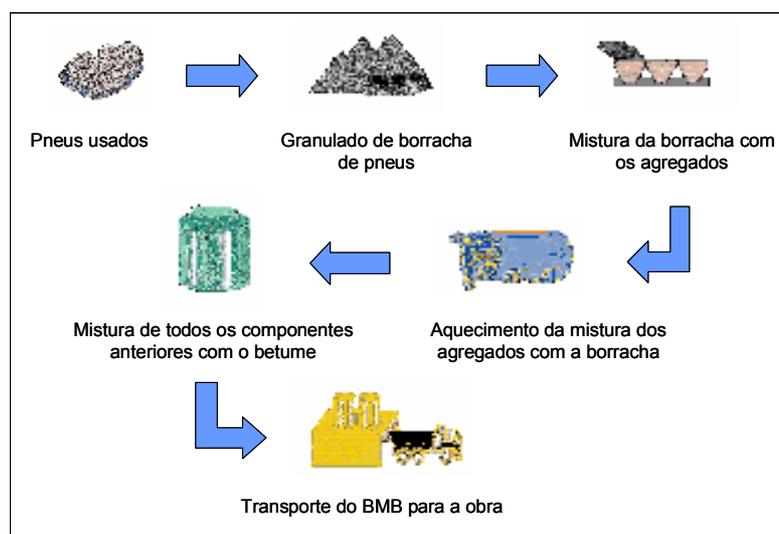


Figura 4.10 – Via seca⁴⁷

As técnicas de produção da mistura no processo seco são semelhantes às utilizadas na produção de misturas betuminosas convencionais, mas existem estudos que demonstram que as misturas betuminosas executadas com adição de granulado de borracha têm as suas propriedades melhoradas.

É muito importante controlar adequadamente a quantidade de granulado de borracha que se adiciona à mistura betuminosa, pois trata-se de uma componente muito crítica, que põe em causa o bom comportamento da mesma [Soto e Victoria, 2005].

Comparando com o processo húmido, a via seca é menos popular uma vez que aumenta os custos devido a ter uma prestação inferior, ter pouca reprodutibilidade (não se garante homogeneidade da mistura betuminosa e portanto tem-se um menor controlo sobre a mesma) e apresentar algumas dificuldades aquando da construção do pavimento. No entanto, a via seca permite utilizar maiores quantidades de borracha e tem por isso apresenta vantagens ambientais [Antunes e Sousa, 2005].

Não obstante, estudos realizados, também, indicam que as misturas obtidas neste tipo de processo, apresentam uma maior aderência entre os pneus e o pavimento, melhorando a segurança que a estrada pode oferecer, diminuem o ruído de circulação, aumentam a resistência a deformações plásticas, fadiga e fissuração, são mais resistentes às deformações devidas a altas e baixas temperaturas e eliminam placas de gelo de uma forma mais rápida [Asefma, 2005].

No processo de fabrico da mistura com BMB, as principais diferenças em relação ao fabrico de misturas betuminosas convencionais são as seguintes [Soto e Victoria, 2005]:

⁴⁷ Fonte: [IDU, 2005]

1. É necessário haver uma mistura prévia entre os agregados e o granulado de borracha, antes de adicionar o betume;
2. Deve-se aumentar a temperatura de fabrico (são usuais as temperaturas de 175 °C à saída do misturador em misturas semi-densas e descontínuas, e 160 °C em misturas drenantes);
3. Há que ter em conta que as misturas com granulado de borracha ocupam mais volume (aproximadamente mais 5%) no misturador, que uma mistura convencional com o mesmo peso;
4. O processo de fabrico por via seca, requer um período de armazenamento em depósitos e nos camiões, para que o material reaja suficientemente e não continue a aumentar de volume depois de colocado em obra. O tempo de reacção necessário determina-se em laboratório e deve-se comprovar em obra.

O fabrico por via húmida e por via seca são processos com tecnologias de fabrico diferentes, principalmente no que diz respeito ao consumo de borracha. A fiabilidade dos produtos obtidos e os benefícios das misturas betuminosas com borracha obtidos nos dois processos também são diferentes [Medina e Granados, 2003]. Em condições experimentais utilizadas, constatou-se que o método húmido conduz a coesões maiores que o método seco [Medina e Granados, 2003].

O processo por via seca, como já foi referido anteriormente, pode incorporar quantidades bastante significativas de borracha, no entanto a fiabilidade resultante é média, circunstância derivada de uma série de parâmetros que por vezes são difíceis de controlar em obra, razão pela qual actualmente este processo não pode competir com o processo por via húmida, sobretudo em estradas com tráfego muito elevado [Asefma, 2005].

De referir, que cada processo produz BMB com características diferentes, permitindo obter misturas betuminosas diferentes, que podem ser aplicadas em situações diferentes. Ou seja, pode-se obter misturas betuminosas específicas que se podem ajustar adequadamente aos mais diversos problemas em projecto e em obra.

- **Processo por Via Mista**

Actualmente, pode-se considerar a existência de um terceiro processo de fabrico, o processo misto, o qual combina o processo por via húmida e o processo por via seca. Trata-se de um processo que está a ser desenvolvido e que se baseia no emprego de betume modificado com borracha no betume e uma pequena quantidade de borracha triturada em forma de agregados [Asefma, 2005].

Em todas as misturas betuminosas com BMB, independentemente do método de fabrico, têm como resultado uma maior duração, resistência e segurança em relação aos restantes betumes convencionais [Soto e Victoria, 2005].

4.4 Tipos de Misturas com BMB e suas Aplicações

Como já foi referido anteriormente cada processo de fabrico do BMB origina produtos diferentes que por sua vez têm aplicações distintas.

Cada fabricante, conforme a tecnologia de fabrico, utiliza diferentes percentagens de borracha, diferentes tipos e teores de betume, diferentes dimensões e proporções de fracções granulométricas, obtendo-se assim misturas betuminosas com prestações e fiabilidades diferentes.

De uma forma resumida apresenta-se no Quadro 4.2 algumas das características dos tipos de betumes que se podem obter segundo os processos descritos anteriormente:

	Tecnologia Utilizada		
	Via Húmida		Via seca
	Betumes com elevado teor de borracha (via húmida – fabrico <i>in situ</i> /central)	Betumes com baixo teor de borracha (via húmida – fabrico em fábrica/refinaria)	
Granulometrias	Descontínuas Drenantes	Contínuas Descontínuas Drenantes	Contínuas Descontínuas
Ligante S/ Mistura (%)	8-10	4-6	5-6
Borracha S/ Mistura (%)	2	0,5	1-2
Fiabilidade da Mistura	Alta	Alta	Média

Quadro 4.2 – Características das misturas betuminosas segundo a tecnologia de incorporação de borracha⁴⁸

- **Processo Via Húmida**

1. Fabrico em central/*in situ* – Betumes com elevado teor de borracha [Medina e Granados, 2003]

Os betumes com alto teor de borracha são fabricados em centrais betuminosas e fornecem misturas com BMB em tempo real, em que 2% do peso da mistura betuminosa será constituída por borracha.

Como se pode observar no Quadro 4.2, as misturas com elevado teor de borracha, têm uma elevada percentagem de ligante, que se situa entre os 8 e 10% (sobre o peso dos agregados). A elevada percentagem de ligante confere à mistura betuminosa uma excelente resistência a deformações plásticas. É devido a esse alto teor de ligante na mistura betuminosa que confere aos BMB fabricados em central uma maior resistência à fadiga e à reflexão de fissuras comparativamente a outras misturas betuminosas.

Tecnicamente, desejam-se misturas betuminosas resistentes à fadiga, ao envelhecimento e à reflexão de fissuras, propriedades que se melhoram aumentando a percentagem de betume. Mas esse aumento, também incrementa o risco de deformações plásticas. Esta

⁴⁸ Adaptado de [Medina e Granados, 2003]

condição resolve-se mediante uma solução de compromisso: uma percentagem de betume suficientemente alta para conferir à mistura betuminosa uma boa resistência à fadiga, mas não tão alta que provoque deformações plásticas, traduzidas por rodeiras no pavimento.

As vantagens imediatas deste incremento de betume são a maior resistência à fadiga, ao envelhecimento e à reflexão de fissuras.

As misturas betuminosas com uma alta percentagem de borracha podem-se aplicar em camadas de desgaste, com granulometrias descontínuas ou rugosas. Estas camadas aplicam-se sobretudo quando se esperam problemas de fadiga, de reflexão de fissuras e de envelhecimento precoce. Não se utilizam granulometrias contínuas dado que não existiriam vazios suficientes para albergar a percentagem de ligante.

Devem-se aplicar BMB com elevado teor de borracha em casos exigentes, como por exemplo em estradas em que a fadiga e a reflexão de fissuras comprometam o resultado a médio prazo.

Este tipo de betumes deve ser aplicado sobre pavimentos rígidos e semi-rígidos, em camadas de desgaste sobre bases tratadas com cimento, ou sobre camadas recicladas com cimento. Podem também ser aplicadas em outro caso extremo, ou seja em superfícies muito deformadas, que necessitam de ser reforçadas com misturas betuminosas muito flexíveis e resistentes ao envelhecimento.

As misturas betuminosas com BMB produzido *in situ*, podem-se aplicar em todo o tipo de estradas, sobretudo em estradas com tráfego muito elevado.

2. Fabrico em fábrica/refinaria – Betumes com baixo teor de borracha [Medina e Granados, 2003]

O fabrico de betumes com baixo teor em borracha é realizado em fábricas e/ou em refinarias. O BMB obtido é similar aos betumes modificados com polímeros. Incorporam cerca de 0,5% de borracha do peso da mistura betuminosa, cerca de quarto vezes menos que o tipo de betume anterior.

Os betumes com baixo teor de borracha têm também, como os betumes de elevado teor de borracha, uma fiabilidade alta. De salientar, que para não perderem a sua característica de serem estáveis ao armazenamento, não podem incorporar mais de 0,5% de borracha na composição da mistura betuminosa, o que do ponto vista ambiental é uma limitação.

As misturas betuminosas produzidas em fábrica, podem-se aplicar em todo o tipo de estradas, inclusive nas estradas com tráfego elevado.

Recorre-se a este tipo de misturas betuminosas, sempre que pretende uma qualidade superior à obtida com misturas betuminosas convencionais.

- **Processo Via Seca**

O processo de fabrico por via seca, consiste em misturar a borracha reciclada de pneus com os agregados antes de se adicionar o ligante betuminoso.

Como se pode observar no Quadro 4.2, em relação ao peso da mistura betuminosa, incorporam-se percentagens de borracha entre 1 a 2%.

Verifica-se que o processo por via seca também pode incorporar grandes quantidades de borracha, todavia, a mistura apenas oferece uma fiabilidade média, devido a parâmetros difíceis de controlar em obra.

A sua aplicação adequa-se sobretudo a estradas que apresentem uma taxa média de tráfego. Exige um controlo de qualidade exaustivo, dado que qualquer erro efectuado na fabricação ou obra põe em causa a sua eficiência.

Dentro das técnicas de incorporação de borracha reciclada de pneus, dever-se-á escolher a que melhor se adapta ao problema, tendo também em consideração os custos envolvidos.

4.4.1 Domínio de Utilização

Consoante o processo de obtenção do BMB, conseguem-se misturas betuminosas com características diferentes e com domínios de utilização distintos, os quais se descrevem de seguida.

- **Mistura betuminosa descontínua, rugosa**

A mistura betuminosa rugosa, de granulometria descontínua é utilizada em camadas de base e desgaste de pavimentos, com funções estruturais ou funcionais (atrato e ruído) respectivamente. A sua utilização quer em pavimentos novos ou em reabilitações de pavimentos, assegura um elevado retardamento na propagação de fissuras, relacionadas com fenómenos de fadiga e/ou retracção, dependendo da tipologia do pavimento considerada [RECIPAV, 2005].

- **Mistura betuminosa drenante, aberta**

A mistura betuminosa drenante é usualmente utilizada em camadas de desgaste de pavimentos, com funções essencialmente funcionais e devido ao elevado teor em ligante utilizado, garante-se uma óptima resistência à propagação de fissuras [RECIPAV, 2005].

A mistura betuminosa drenante pode ser colocada sobre pavimentos novos ou em obras de conservação, onde é necessário intervir ao nível da reabilitação das características de superfície e também de regularidade, em pavimentos flexíveis ou em pavimentos de betão [RECIPAV, 2005].

Pode ser também aplicada como camada intermédia, actuando como anti-propagação de fendas [Fonseca, 2005].

Tendo em conta a sua composição granulométrica, esta mistura garante uma elevada macro-textura e conseqüentemente, evita a projecção da água do veículo da frente, aumentando a

visibilidade da estrada. Também devido à sua composição granulométrica, este tipo de mistura permite redução de ruído e aumenta o atrito, aumentando o conforto de condução.

- **Mistura contínua**

Neste tipo de mistura, não existe uma percentagem tão elevada de vazios, como nas misturas anteriores, contribuindo assim para obtenção de uma mistura mais fechada, aumentando a resistência à água, ao envelhecimento, à fadiga e às deformações permanentes.

A mistura betuminosa de granulometria contínua pode ser aplicada em pavimentos novos ou em obras de conservação, onde é necessário reabilitar as características de superfície e também as estruturais.

O BMB pode ser aplicado em tratamentos superficiais, como em revestimentos superficiais, microaglomerados, *slurry seal*, técnicas anti-fendas, SAM (*Stress Absorbing Membrane*) e SAMI (*Stress Absorbing Membrane Interlayer*). Conseguindo-se assim melhorar as características superficiais e indirectamente as estruturais, uma vez que esses tratamentos superficiais não permitem a infiltração de águas nas camadas inferiores de pavimentos que apresentam um elevado grau de fendilhação à superfície. Estes produtos são obtidos através do processo por via húmida e são fabricados *in situ*. Como este tipo de produtos usufrui de grandes percentagens de borracha e betume, conseguem-se elevadas viscosidades, elevadas coesões, grandes flexibilidades e uma óptima impermeabilização, propriedades importantes para um bom desempenho deste tipo de misturas.

- **SAM (*Stress Absorbing Membrane*)**

Trata-se de uma membrana que geralmente é aplicada para prevenir e/ou retardar fendas por reflexão de fendas em pavimentos betuminosos. Consiste em distribuir uma camada com BMB sobre a superfície do pavimento existente seguida de uma camada de agregados uniformemente espalhados sobre o ligante. A espessura da camada depende da granulometria do agregado, variando de 6 a 9 mm [Hicks *et al*, 1995].

- **SAMI (*Stress Absorbing Membrane Interlayer*)**

Camada de betume betuminoso, aplicada entre a camada betuminosa existente e a camada de reforço (Figura 4.11), quando da execução de uma reabilitação, para retardar o desenvolvimento de fendas por flexão e reduzir a penetração de água nas camadas subjacentes [Hicks *et al*, 1995].

A sua utilização tem uma óptima relação custo/benefício quando combinada com a utilização da técnica de reciclagem *in situ* com cimento, em obras de reabilitação de pavimentos rígidos e na aplicação de pavimentos flexíveis fissurados [RECIPAV, 2005].

Permite também uma excelente colagem entre a camada inferior e superior, quer no caso de misturas tratadas com ligantes hidráulicos na camada inferior e das misturas betuminosas nas camadas superiores [RECIPAV, 2005].

De uma forma resumida, pode ser aplicada como revestimento superficial, membrana entre misturas betuminosas e *cape-seal* [Fonseca, 2005].

Figura 4.11 – Exemplo de aplicação – SAMI⁴⁹

Sumariamente, pode-se afirmar que as misturas com BMB, têm um vasto campo de aplicação. A aplicação de misturas com BMB de pneus reciclados, incluem os trabalhos de conservação periódica, tais como selar juntas e fendas, interfaces anti-propagação de fissuras, misturas betuminosas a quente e revestimentos superficiais. A utilização de misturas com BMB em conservação e/ou reabilitação de estradas permite melhorias do pavimento tanto funcionais como estruturais.

4.5 BMB em Portugal

Actualmente em Portugal, existem cinco empresas que fabricam o BMB: CEPESA, GALP, LUSASFAL, RECIPIAV e REPSOL. O objectivo de obter um ligante com qualidade e com melhores características, através da incorporação de borracha reciclada está patente nas cinco empresas, contudo cada uma das empresas apresenta produtos diferentes e até mesmo processos de fabrico diferentes. No Quadro 4.3, pode-se observar as diferenças mais notórias entre as cinco empresas que fabricam o BMB em Portugal. O ponto comum em todas elas é o processo de fabrico realizado por via húmida.

Processo por Via Húmida					
Empresas	CEPSA	GALP	LUSASFAL	RECIPIAV	REPSOL
Fabrico	Refinaria	Fábrica Refinaria	Fábrica	Central <i>in situ</i>	Fábrica Refinaria
Processo de obtenção de borracha	Ambiental	Ambiental	Criogénico e Ambiental	Criogénico	Ambiental
Produtos	Betún Caucho 2	Polybitume C2 35/50	LUSO _{FLEX} 1	BMB 35/50	Betume com borracha de pneu 35/50
	Betún Caucho 3b	Polybitume C 55/70	LUSO _{FLEX} 2	BMB 50/70	Betume com borracha de pneu 55/70
Viscosidade	Baixa	Baixa	Baixa	Elevada	Baixa
Armazenamento	Estável	Estável	Estável	Instável	Estável

Quadro 4.3 – Características das misturas betuminosas segundo a tecnologia de incorporação de borracha

⁴⁹ Fonte: [Recipav, 2005]

De seguida, descrevem-se os processos de fabrico que cada empresa pratica, assim como misturas que fabricam. No anexo 1 desta dissertação, está patente um quadro, cedido pela Comissão Técnica 153 Ligantes Betuminosos – Grupo de Trabalho - Betumes Modificados com Borracha de Pneus Usados, com a comparação das características do BMB obtidos pelos produtores anteriormente referidos.

- **Características do ligante fabricado pela CEPSA**

A CEPSA produz o BMB nas suas refinarias e segundo Vieira⁵⁰, o fabrico na refinaria permite o controlo do ligante previamente à fabricação da mistura. Os produtos obtidos são mais homogéneos que os fabricados *in situ*, sendo as percentagens de granulado de borracha admissíveis para conseguir betumes estáveis e os poder manejar adequadamente nas instalações [Vieira, 2005]. A borracha que é adicionada ao betume para o modificar é obtida através do processo ambiental e a percentagem que é incorporada no betume é menor que o BMB fabricado *in situ*, atribuindo à mistura uma viscosidade mediana.

O seu fabrico é realizado a temperaturas entre os 180 e os 195 °C e tem lugar nas mesmas centrais de produção dos BMP, que são capazes de dispersar eficazmente as partículas de pó de borracha. Além da borracha e do betume, são incorporadas na mistura do betume modificado, outras matérias-primas: óleos compatibilizadores, aditivos e/ou catalizadores, polímeros químicos (SBS, ...), etc. [Vieira, 2005].

A CEPSA desenvolveu betumes-borracha estáveis ao armazenamento, que cumprem especificações exigidas aos betumes modificados com polímeros.

O transporte do BMB obtido na refinaria posteriormente é realizado através de cisternas até às centrais de misturas betuminosas, onde depois se podem fabricar misturas betuminosas contínuas, descontínuas ou drenantes.

- **Características do ligante fabricado pela GALP**

O betume fabricado pela GALP, utiliza exclusivamente borracha procedente da reciclagem de pneus. A sua especial formulação confere-lhe propriedades semelhantes às dos betumes modificados com polímeros convencionais de altas prestações, incluindo a viscosidade. Estes BMB's podem ser fabricados com viscosidades baixas que permitem a sua utilização dentro do exigido nas normas Europeias no que diz respeito à temperatura de fabrico, com emissões de gases similares aos BMP [Seixas, 2005].

Este ligante betuminoso é produzido e ensaiado em fábrica onde tem um efectivo controlo de qualidade. Depois pode ser armazenado, mantendo a estabilidade. A estabilidade ao armazenamento constitui uma das vantagens mais importantes, uma vez que permite a trabalhabilidade das misturas betuminosas durante o tempo necessário para a execução dos trabalhos de pavimentação [Moura e Pamplona, 2005].

Esta solução assegura um comportamento muito semelhante ao do betume modificado com polímeros destacando-se a excelente adesividade aos agregados e a elevada resistência ao envelhecimento.

⁵⁰ [Vieira, 2005]

Foram desenvolvidos BMB's com aplicações específicas (Misturas betuminosas densas e descontínuas) [Seixas, 2005].

A juntar a estes aspectos menciona-se um outro não menos importante, como a facilidade em termos logísticos uma vez que ao chegar à central de misturas betuminosas necessita apenas de um reservatório dedicado tal como os betumes modificados de uso corrente. Não são portanto necessários meios adicionais para o trabalho com este produto o que torna esta solução economicamente vantajosa [Moura e Pamplona, 2005].

O BMB fabricado pela GALP, utiliza-se em misturas betuminosas contínuas, descontínuas e drenantes.

- **Características do ligante fabricado pela LUSASFAL**

O BMB produzido pela LUSASFAL, apresenta também um comportamento semelhante ao dos betumes modificados com polímeros.

O betume puro a modificar é armazenado a temperaturas mínimas, que permitem o seu manuseamento e só na altura exacta de produzir a modificação, a empresa está munida de um potente intercomunicador de calor que em segundos eleva a temperatura do betume armazenado a 180/200 °C.

O BMB é obtido em fábrica através do método por via húmida e utilizando borracha reciclada de pneus, triturada tanto pelo método criogénico como pelo método ambiental. A LUSASFAL, tem uma peculiaridade no fabrico do BMB, que consiste na incorporação de borracha reciclada de pneus com dimensões superiores às utilizadas pelo processo de fabrico *in situ* (menores que 0,4 mm), que também incorpora borracha triturada pelo processo criogénico. Isso deve-se a um moinho existente entre dois depósitos (Figura 4.12). No primeiro reaktor coloca-se o betume, posteriormente o granulado de borracha reciclada de pneus, a mistura fica aí a ser agitada durante um dado período de tempo para sofrer a digestão. Para a mistura passar para o segundo depósito (depósito de amadurecimento da mistura), previamente passa por um moinho que tritura a borracha em dimensões mais pequenas (19 microns). A utilização desse moinho tem como objectivo diminuir o tamanho das partículas de borracha para que essas se dissolvam no betume num curto espaço de tempo, ou seja, o moinho funciona como um processo de trituração.



Figura 4.12 – Depósitos de fabrico de BMB na LUSASFAL

No segundo depósito, existe a possibilidade de programar outra temperatura menor com uma velocidade de agitação controlada ainda com um número de pás superior ao reactor.

Este ligante betuminoso é produzido em fábrica, onde tem um efectivo controlo de qualidade, e é rigorosamente controlado em laboratório.

O BMB da LUSASFAL é estável ao armazenamento, apresenta viscosidade baixa e cumpre com especificações exigidas aos betumes modificados com polímeros.

Após o fabrico do BMB, esse é conduzido para várias centrais de misturas betuminosas, onde posteriormente fabricam misturas que podem ser contínuas, descontínuas ou drenantes.

A empresa LUSASFAL anda a realizar estudos de emulsões com BMB. A empresa já consegue emulsioná-lo, no entanto, ainda continua com estudos para obter uma maior estabilidade. Assim, será possível realizar misturas a frio, a temperaturas máximas de 70 °C, o que do ponto de vista ecológico e energético, são bastante vantajosas.

- **Características do ligante fabricado pela RECIPAV**

A modificação do ligante betuminoso, é realizada junto a centrais para o fabrico de misturas betuminosas com equipamento apropriado e que deverá ser constituído por um misturador e tanques de reacção com controlo de temperatura, em número adequado à produção da central betuminosa.

Este método de fabrico realizado pela RECIPAV faz com que esta empresa funcione como um sub-empregado de fabrico de misturas betuminosas com BMB.

A adição da borracha ao betume quente faz com que esta reaja absorvendo e fixando os maltenos, que constituem a fracção volátil e aromática do betume. Assim, torna-se possível obter um aumento da resistência ao envelhecimento que consequentemente aumenta a durabilidade do pavimento.

Segundo a RECIPAV⁵¹, a adição de borracha permite ainda obter um ligante com excelentes propriedades elastómeras, nomeadamente alta viscosidade a altas temperaturas e boa flexibilidade a baixas temperaturas. Essa viscosidade elevada deve-se sobretudo a um maior incremento de borracha (com dimensões muito pequenas, menores que 0,4 mm) e de uma grande percentagem de betume. Devido a esse facto, o BMB não é estável ao armazenamento, aconselhando-se a aplicação das misturas com BMB, posteriormente ao seu fabrico.

O betume fabricado pela RECIPAV, cujo processo de fabrico está definido pela norma ASTM D 6114, incorpora no mínimo, cerca de 20 a 22% de granulado de borracha [RECIPAV, 2005].

As misturas fabricadas por essa empresa são: mistura betuminosa aberta, normalmente conhecidos por misturas betuminosas drenantes, mistura betuminosa rugosa, normalmente conhecidos por misturas betuminosas descontínuas e revestimentos superficiais (membrana anti-propagação de fendas SAMI-BMB).

⁵¹ [Recipav, 2005]

- **Características do ligante fabricado pela REPSOL**

A produção do BMB pela REPSOL é efectuada em fábrica, por via húmida, permitindo garantir um rigoroso controlo de todo o processo produtivo, bem como, a qualidade final do produto [Nunes, 2005].

Para o fabrico de betume com borracha de pneu, são utilizados betumes base especialmente seleccionados, por forma assegurar uma perfeita compatibilidade com a borracha incorporada. O granulado de borracha incorporado no betume é obtido por trituração ambiental, e as dimensões desse granulado são normalmente inferiores a 0,8 mm [Nunes, 2005].

O produto apresenta uma viscosidade baixa e é produzido a temperaturas entre os 180 e os 185 °C.

As suas propriedades correspondem, na mistura betuminosa, a uma melhoria da coesão, da resistência à fadiga e das deformações plásticas. Trata-se de um produto perfeitamente estável ao armazenamento (durante dias).

As características encontram-se em conformidade com as especificações NTL para os betumes modificados.

Recomendável para a produção de camadas de desgaste, em mistura betuminosa descontínua.

4.6 Transporte para a Obra de Misturas com BMB

O transporte das misturas com BMB pode ser efectuada em camiões convencionais, do mesmo tipo que se utiliza para o transporte de misturas betuminosas, estas devem ser cobertas com lonas excepto para distâncias muito curtas. Se forem utilizados líquidos anti-aderentes nas caixas dos camiões, estes não deverão ter dissolventes ou fuel [Vieira, 2005].

O fabrico por via húmida, *in situ*, das misturas betuminosas contendo BMB, são transportadas e aplicadas em obra geralmente a seguir à sua fabricação, como as outras misturas betuminosas convencionais.

Quanto ao transporte e armazenamento do BMB que é produzido em fábrica/refinaria, esse será transportado em cisternas caloríficas providas de termómetros. As cisternas devem estar preparadas para aquecer o betume, quando devido a qualquer anomalia a temperatura do BMB baixe excessivamente. O BMB é transportado até às centrais betuminosas onde posteriormente se fabricarão misturas betuminosas com BMB para depois serem aplicadas em obra, como outra mistura betuminosa de fabrico convencional.

Existem várias empresas que actualmente estão a desenvolver a sua tecnologia de modificação do betume com borracha. Essa tecnologia também abrange equipamentos de transporte e armazenamento especiais. O objectivo é facilitar a utilização do BMB, com vista a diminuir a preocupação com o armazenamento e transporte.

Após a operação de fabrico das misturas betuminosas com BMB, essas serão colocadas em obra da mesma forma que as misturas betuminosas convencionais.

4.7 Colocação em Obra de Misturas com BMB

O espalhamento em obra não exige particularidades distintas relativas aos betumes modificados com polímeros convencionais [Seixas, 2005].

A colocação em obra de misturas betuminosas com BMB realiza-se de uma maneira convencional, no entanto há que ter alguns cuidados para evitar o arrefecimento prematuro da material, já que a elevada viscosidade do ligante pode prejudicar a compactação a temperaturas inferiores a 120 °C, em que algumas misturas betuminosas são manejáveis [Soto e Victoria, 2005].

A mistura betuminosa com betume-borracha deve colocar-se quando as condições climáticas sejam óptimas. A temperatura do suporte também deve ser adequada (superior a 10 °C). Se a temperatura do suporte for baixa, a temperatura da mistura betuminosa arrefece muito rapidamente e depois será muito difícil alcançar a densidade necessária. Neste aspecto dever-se-á ter um cuidado acrescido comparativamente às misturas convencionais [Soto e Victoria, 2005].

A mistura que entra na pavimentadora deve fluir livremente, ser homogénea e não devem haver concentrações de finos e grossos nem escorrimientos do ligante [Soto e Victoria, 2005].

A pavimentadora deve trabalhar sem paragens, para que o material não arrefeça muito rápido e não se forme ressaltos difíceis de eliminar [Vieira, 2005].

A temperatura da mistura betuminosa no início da compactação deve ser pelo menos de 160° C. Os cilindros compactadores devem ser humedecidos com água, ou se necessário com água e sabão para impedir a aderência da mistura betuminosa durante a fase de compactação.

Tanto a aplicação como a compactação do BMB, não sofre modificação comparativamente com a aplicação e compactação do betume convencional, a não ser pelos detalhes de temperatura, estes sim com significativas alterações.

Júnior e Greca⁵² recomendam temperaturas que devem ser aplicadas na elaboração e aplicação do BMB, indicadas na figura (Figura 4.13). As temperaturas dependem de vários factores como, do betume base, do local, das condições atmosféricas, do processo de fabrico, etc..

Temperaturas (°C)	Mínima	Máxima
- Do ligante, pré-fabrico	165	177
- Do agregado, pré-fabrico	170	177
- Mistura, após-fabrico	165	175
- Compactação, mín.	155	A máxima que a mistura possa suportar

Figura 4.13 – Temperaturas a serem aplicadas na elaboração e aplicação do BMB⁵³

⁵² [Júnior e Greca, 2003]

Segundo os mesmos autores, Júnior e Greca⁵⁴, é recomendável que a mistura betuminosa ao ser descarregada do silo para o camião de transporte apresente uma temperatura máxima de 177 °C. Caso a temperatura alcance valores superiores é necessário reduzir a temperatura do ligante betuminoso e/ou dos agregados.

Quanto à temperatura de compactação da mistura betuminosa já colocada na estrada, pode ser realizada a temperatura inferior a 155 °C, neste caso deve ser observado o grau de compactação mínimo de 97%. A temperatura de compactação deve oscilar entre os 140/160 °C indicados, devendo-se ter um cuidado redobrado para evitar a fendilhação da massa, quando muito quente, e a formação de “ondas” à frente do rolo [Asefma, 2005].

O empolamento de cada tipo de massa deve ser ajustado no campo, normalmente a espessura de mistura solta (no caso de misturas densas) deve-se situar em torno de 30% superior à da espessura da mistura compactada [Júnior e Greca, 2003].

Independentemente da espessura de aplicação da mistura betuminosa compactada, deve-se otimizar o transporte e a compactação para se atingir um grau de compactação mínimo de 97% da densidade de projecto.

É muito importante o controlo adequado da compactação. O elevado conteúdo de betume deste tipo de misturas e a sua viscosidade podem influenciar a compactação da mistura [Vieira, 2005].

É de referir, que a compactação deve-se realizar com cilindro de rasto liso (cilindros metálicos ou vibratórios), devendo-se evitar a compactação com o cilindro de pneus [Medina e Granados, 2003], pois o material tende a aderir às rodas e levantar-se, devido à mistura conter borracha que incrementa uma adesividade superior à mistura betuminosa. No caso de misturas abertas ou rugosas não deve ser utilizada a vibração [Vieira, 2005].

Por vezes, para se obter um bom grau de compactação devem-se utilizar dois rolos pneumáticos pesados e dois rolos *tandem*, aliados aos cuidados com a calibragem dos pneus de forma adequada, procurando-se induzir maiores pressões de compressão. A compactação vibratória após a compactação pneumática também apresenta excelentes resultados, tanto no aspecto do grau de compactação como em termos de acabamento final da camada.

Os cilindros compactadores devem ir o mais próximo possível à espalhadora sem provocar levantamentos do material ou ondulações à mistura. Os compactadores devem utilizar líquidos anti-aderentes [Vieira, 2005].

Nas misturas fabricadas por via seca, o cilindro compactador deve continuar o seu trabalho até que a temperatura baixe até aos 80 °C. Como a borracha só reage parcialmente, o material da camada compactada continua a reagir, ao encontrar-se em temperaturas elevadas. A referida reacção faz com que a mistura sofra um aumento de volume e se expanda. Estes efeitos só se minimizam quando ao BMB é incrementado granulado de borracha reciclada de pneus com dimensões reduzidas, aumentando assim a velocidade de reacção [Soto e Victoria, 2005].

⁵³ Adaptado de [Júnior e Greca, 2003]

⁵⁴ [Júnior e Greca, 2003]

Tanto na reabilitação como na construção, segundo Vieira⁵⁵ devem ser aplicadas regas de colagem modificadas nomeadamente com elastómeros, para uma melhor ligação entre as camadas.

Deve-se dar especial atenção à monitorização das temperaturas no campo, de forma a identificar o momento ideal para o início da abertura da estrada ao tráfego, utilizando termómetros digitais.

A estrada pode ser aberta ao trânsito imediatamente após o arrefecimento da mistura betuminosa, como preceitua a boa técnica.

As considerações acima válidas para aplicação de misturas betuminosas contínuas densas, merecem um reparo apenas no caso das misturas descontínuas, já que estas normalmente são compactadas somente com rolos metálicos, evitando-se a utilização de rolos pneumáticos que podem puxar o ligante para a superfície, e conseqüentemente não proporcionar uma compactação adequada.

4.8 BMB na Reabilitação e Construção de Pavimentos

As misturas betuminosas com BMB, podem ser aplicadas tanto em construção de novas estradas como na reabilitação de estradas. A sua aplicação pode efectuar-se tanto a nível de camadas de desgaste como de camadas inferiores.

As principais aplicações das misturas com BMB na pavimentação de estradas incluem os trabalhos de conservação periódica tais como selagem de juntas e fissuras, execução de interfaces anti-propagação de fissuras, misturas betuminosas a quente e revestimentos superficiais.

No caso de construção nova de estradas esses betumes são aplicados em interfaces anti-propagação de fissuras e em misturas betuminosas a quente para camadas de regularização e/ou de desgaste [RECIPAV, 2005].

Segundo Moura e Pamplona⁵⁶, o BMB utiliza-se sobretudo em locais em que é necessária uma grande resistência às deformações plásticas e fadiga por envelhecimento.

4.8.1 BMB na Reabilitação de Pavimentos

Um dos principais problemas colocados na reabilitação de pavimentos está associado à reflexão de fendas dos pavimentos. Nestes casos, as medidas vulgarmente utilizadas têm uma eficácia relativa e contribuem indirectamente para a futura capacidade estrutural do reforço.

Com a utilização das misturas betuminosas com BMB, nomeadamente a mistura rugosa, assegura-se uma eficaz barreira contra a propagação de fendas, e ao mesmo tempo, ganha-se em termos de contribuição estrutural o que torna estas soluções mais económicas do que as soluções tradicionais [RECIPAV, 2005].

Na reabilitação de pavimentos, o seu uso está intimamente ligado com situações de envelhecimento precoce do pavimento que apresenta um elevado estado de fadiga (fissuração), ou como forma de melhorar as características superficiais em várias aspectos, nomeadamente na melhoria em termos de atrito e/ou ruído de circulação.

⁵⁵ [Vieira, 2005]

⁵⁶ [Moura e Pamplona, 2005]

Em termos de reabilitação de pavimentos em estado de ruína por fadiga, a utilização das misturas betuminosas com BMB acompanhadas pela eventual aplicação prévia de uma SAMI, têm evidenciado uma excelente relação custo/benefício. Nestas aplicações, e ao contrário das misturas betuminosas convencionais, não é necessário fresar as zonas em pior estado de fendilhamento, desde que globalmente, o pavimento apresente uma deformação aceitável face às características mecânicas das misturas betuminosas com BMB a utilizar [RECIPAV, 2005].

Na reabilitação, a mistura betuminosa aberta ou a SAMI, têm sido utilizadas como sistema ou membranas anti-propagação de fendas e ao mesmo tempo como medida de impermeabilização do pavimento existente, colocadas em camadas intermédias de pavimentos novos.

A utilização de misturas betuminosas com BMB, aparece muitas vezes relacionada com a reciclagem, sobretudo com a reciclagem *in situ* com cimento, 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 com cimento, e por outro a aplicação de camadas delgadas de misturas betuminosas com a incorporação da borracha reciclada de pneus, garante a funcionalidade da estrada no tempo [RECIPAV, 2005]. Esse tipo de soluções permite ainda que a estrada adquira novas características funcionais e superficiais, respeitando cotas de soleiras.

No caso da utilização de revestimentos superficiais com BMB, estes podem ser utilizados conjuntamente com um microaglomerado permitindo obter uma camada de desgaste com menos ruído e mais resistente às acções de tráfego pesado.

Nos pavimentos flexíveis em bom estado em termos estruturais, o BMB é usado na camada de desgaste com o intuito de melhorar as características funcionais da estrada. Nestes casos geralmente é usada uma mistura betuminosa aberta com espessura de 25 a 30 mm para melhorar a regularidade longitudinal, reduzir a possibilidade de propagação de fendas, proporcionar uma resistência à derrapagem apropriada e reduzir o ruído. Em pavimentos muito fissurados, geralmente com espessuras entre 30 e 60 mm, para prevenir a reflexão da fissuração. Pode ser colocada sobre esta, uma camada de granulometria aberta com BMB de 25 a 30 mm, dependendo do volume de tráfego, do tipo de estrada e a sua localização (zona chuvosa, zona com muita ocupação marginal para controlar o nível de ruído, etc.) [RECIPAV, 2005].

4.8.2 BMB na Construção

Em pavimentos novos e numa óptica de racionalização da relação custo/benefício da estrutura do pavimento o BMB aparece, geralmente, em pavimentos constituídos por bases tratadas com cimento ou bases de alto módulo.

No caso de bases tratadas com cimento e tendo presente a retracção/dilatação deste material, geralmente aplica-se um revestimento superficial com BMB (SAMI) seguido de uma aplicação de uma camada de granulometria descontínua com BMB e, na camada de desgaste, uma camada de granulometria aberta com BMB.

A utilização de BMB em conjunto com bases tratadas com cimento, justifica-se devido à sua elevada resistência à propagação de fissuras, em comparação com a composição tradicional da maioria das

estradas, além de diminuir o recurso sistemático a britas que constituem um recurso natural que convém preservar.

No caso das bases de alto módulo, coloca-se uma ou duas camadas de BMB com o intuito de controlar o aparecimento das fissuras à superfície, resultantes do fenómeno fadiga dessa base (depois de sujeita às estimadas aplicações de carga para as quais o pavimento foi dimensionado) garantindo-se desta forma, um período adicional de vida útil desse pavimento poderá, consoante o caso, significar um decréscimo de 40 a 55% com os custos de conservação [RECIPAV, 2005].

Utiliza-se BMB em substituição do betume convencional, pois reduz os problemas de deformações permanentes traduzidos por rodeiras, fendas de fadiga e fendas devido à retracção térmica, que são os principais problemas apontados na pavimentação betuminosa [Takallov e Saiton, 1992].

4.9 Vantagens e Desvantagens na Incorporação de Borracha nos Betumes

O BMB apresenta muitas vantagens em função da percentagem de borracha de pneus reciclados e da própria formulação da mistura. Contudo, como em qualquer outro betume modificado, existem também desvantagens. De uma forma resumida evidenciam-se as seguintes vantagens e desvantagens:

4.9.1 Vantagens na Incorporação de Borracha nos Betumes

Segundo Martins⁵⁷, a incorporação da borracha no betume, deve melhorar as propriedades reológicas e físicas dos ligantes betuminosos, apresentar resistência à temperatura de trabalho, facilidade de mistura com o ligante base, disponibilidade no mercado e custo compatível para se configurar numa alternativa de desempenho e economia.

Muitas são as vantagens previstas da incorporação da borracha de pneus usados a um betume, de seguida descrevem-se várias.

- **Redução do envelhecimento**

A presença de anti-oxidantes e carbono na borracha dos pneus que é incorporada ao betume proporciona uma redução do envelhecimento por oxidação, independentemente do processo de fabrico escolhido para obter o BMB.

Durante a produção do BMB, dá-se um processo físico-químico, em que o betume quente faz com que a borracha reaja e absorva os maltenos que constituem a parte volátil e aromática do betume. Assim, a fixação desse constituinte permite obter um aumento da resistência ao envelhecimento das misturas com BMB, comparativamente às misturas convencionais onde os maltenos se perdem com o passar do tempo.

Relativamente ao envelhecimento do ligante betuminoso durante o fabrico e a sua vida útil, esse é minimizado com a adição de borracha, tendo em conta dois factores:

1. A espessura sobre o agregado é superior àquela encontrada com ligantes convencionais (devido a uma maior viscosidade do ligante), tal facto garante um menor envelhecimento

⁵⁷ [Martins, 2004]

do ligante durante o seu fabrico [Júnior e Greca, 2003]. O BMB obtido através do processo de fabrico utilizado pela RECIPAV (via húmida – *in situ*), apresenta maiores percentagens de borracha, comparativamente às restantes empresas (CEPSA, GALP e REPSOL), produzindo uma mistura com uma maior viscosidade, com um maior poder de adesão aos agregados. Todavia, o BMB fabricado pela CEPSA, pela GALP e pela REPSOL, também é dotado de viscosidades baixas que também permitem uma maior coesão entre o betume e os agregados.

2. A recuperação elástica do ligante com borracha após a simulação do envelhecimento no ensaio RTFOT, aponta ganho desta característica ao invés de perda que ocorre com os demais ligantes convencionais e modificados por outros polímeros [Morilha e Trichês, 2003].

- **Elevada flexibilidade**

As misturas betuminosas com a adição de borracha são mais flexíveis que as misturas betuminosas convencionais, em virtude da maior concentração de elastómeros existentes na borracha de pneus reciclados e devido a uma melhor adesividade do betume aos agregados, proporcionando uma maior resistência ao fendilhamento [Stephens, 1982; Takallou e Hichs, 1988; McQuillen *et al*, 1988].

- **Aumento do ponto de amolecimento**

A adição da borracha faz com que o ponto de amolecimento do BMB aumente em relação ao ligante convencional [Salter e Mat, 1990], o que significa um aumento da resistência ao acúmulo de deformações permanentes na zona dos rodados.

- **Redução da susceptibilidade térmica**

O uso de um betume-borracha nas misturas betuminosas proporciona uma maior resistência às variações de temperatura, ou seja, apresentam um melhor desempenho tanto a baixas temperaturas quanto a altas temperaturas quando comparadas com pavimentos construídos com ligante betuminoso convencional [Heiztman, 1992].

A consistência do ligante betuminoso tende a permanecer inalterada sob uma larga faixa de temperaturas. Em climas frios, o ligante permanece mais flexível e aumenta a resistência do revestimento à fissuração. Em climas quentes, o maior ponto de amolecimento e a maior viscosidade do ligante aumentam a resistência à deformação permanente.

Assim, uma das principais vantagens do betume modificado é que a sua relação temperatura viscosidade não é linear. Ele é mais viscoso que o ligante tradicional, entretanto não perde a ductibilidade e quando sujeito a altas temperaturas não reduz tanto a sua consistência como os ligantes convencionais, desta maneira, diminui a possibilidade de formação de rodeiras em temperaturas elevadas. Na realidade, o que ocorre baseia-se numa susceptibilidade térmica mais baixa comparando com o betume convencional.

- **Melhores características adesivas e coesivas**

Aumenta a resistência à degradação do pavimento. A resistência coesiva faz com que o ligante betuminoso mantenha os agregados unidos, quando sujeitos à acção das cargas do tráfego, em especial a baixas temperaturas. As misturas betuminosas com BMB, quanto mais viscosidade apresentarem maior é o poder de adesão entre o betume e os agregados.

- **Redução do ruído de circulação**

De acordo com especialistas na matéria, a poluição sonora constitui um dos maiores problemas ambientais sentidos pelas pessoas [RECIPAV, 2005].

Em relação ao ruído de circulação, pode-se referir que segundo testes efectuados no Estados Unidos da América, poderão conseguir-se reduções de ruído no contacto pneu/pavimento, da ordem dos 4 a 8 dBA em misturas betuminosas com BMB. 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(A) teria que se reduzir em 50% o tráfego de uma dada estrada [RECIPAV, 2005].

Em Portugal, segundo o relatório de ensaios, realizado na A8, elaborado a pedido das Auto Estradas do Atlântico, conclui-se que existe vantagem na utilização de pavimentos betuminosos modificados com borracha em vias rápidas, relativamente ao pavimento de betão betuminoso rugoso convencional, em termos de ruído gerado pela circulação rodoviária [Certiprojecto, 2004]. Os resultados permitiram concluir que, nas mesmas condições de tráfego (volumes, percentagem de pesados, velocidades de circulação, relação de caixas de velocidade), existem diferenças médias da ordem de 8 a 10 dB entre os níveis sonoros globais emitidos 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 e para minimização dos impactos acústicos provocados [Certiprojecto, 2004].

A aplicação de camadas de desgaste com BMB pode surgir como complemento ou como medida alternativa à construção de barreiras acústicas, podendo-se assim garantir o cumprimento das exigências regulamentares aplicáveis em matéria de poluição sonora (Dec.-Lei n.º 292/2000).

A GALP também elaborou estudos em misturas betuminosas com o objectivo de reduzir o nível de ruído, em que concluiu que consegue-se atingir reduções entre os 4,6 e os 6,6 dB, conforme as velocidades dos veículos e a composição da mistura [Seixas, 2005], ou seja, a redução do nível de ruído depende sobretudo da composição granulométrica e não tanto do betume modificado com borracha reciclada de pneus.

Em termos de macrotextura 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 de redução de ruído de circulação, do atrito, em resumo, do conforto gerado ao utente. A investigação desenvolvida neste domínio conduziu há já vários anos à utilização de pavimentos drenantes, que permitem alcançar reduções da ordem de 3 dB relativamente a pavimentos não drenantes e, mais recentemente, à utilização de revestimentos integrando

borracha reciclada, que permitem em algumas situações obter reduções dos níveis sonoros bastante expressivas.

As misturas com BMB produzidas na RECIPAV, têm incorporadas grandes percentagens de borracha, dotando a mistura de uma maior viscosidade, formando uma película mais espessa de ligante em torno dos agregados, contribuindo assim para a obtenção de misturas que permitem conseguir a redução do ruído. Contudo, como foi referido anteriormente, a composição granulométrica da mistura é fundamental para contribuir para o decréscimo de ruído.

Como forma de minimizar os impactos ambientais resultantes do ruído, é habitual recorrer-se à utilização de barreiras acústicas e eventualmente à insonorização das janelas dos edifícios. A experiência Americana revela que, actuando ao nível do pavimento com colocação de misturas betuminosas com BMB, pode eliminar-se, em algumas situações, a colocação de barreiras acústicas [Certiprojecto, 2004].

- **Redução da espessura do pavimento**

Além do melhor desempenho deste tipo de ligante, é possível, sob certas condições e mediante uma análise de vida de fadiga e uma análise paramétrica, reduzir-se a espessura de revestimentos projectados com ligantes convencionais. Esta redução justifica-se com base em estudos internacionais que indicam reduções de espessura de até 50% (como no caso da norma Californiana) aquando da utilização de misturas com ligante modificado por borracha de pneus. É possível obter uma redução do pavimento, graças à composição da mistura com o BMB, que permite uma resistência à fadiga 10 vezes superior à de uma mistura betuminosa convencional. Assim, esse facto permite uma redução da espessura da camada com BMB em cerca de 50% face a uma mistura betuminosa convencional, o que de alguma forma, equipara os custos de construção deste tipo de misturas com as misturas convencionais [RECIPAV, 2005].

A redução da camada de reforço proporciona por sua vez uma série de vantagens, como a redução da utilização de dos recursos naturais (agregados e betume), redução dos tempos e custos de transporte, redução dos tempos de execução da camada, e portanto, redução dos custos suportados pelos utentes durante as obras (resultantes de atrasos e/ou acidentes).

Em função da formulação conseguem-se betumes borracha estáveis, com características tais que permitem fabricar misturas com maiores percentagens de ligante que permitem reduzir a espessura da camada betuminosa [Soto e Victoria, 2005].

- **Melhor impermeabilização**

Como as misturas do BMB absorvem melhor os esforços tangenciais, comparando com as misturas betuminosas convencionais, evitam ou retardam a propagação de fissuras. Com a ausência de fissuras no pavimento, torna-se mais difícil a água penetrar e atingir o solo de fundação.

Salientando para o facto da composição do BMB (maior percentagem de ligante) também contribuir para uma maior impermeabilização.

- **Aumento da vida útil do Pavimento**

Uma das conclusões mais importantes de referir é o facto de que quanto mais borracha se incorpora maior é o índice de ligante na mistura betuminosa, maior é a resistência à fadiga e à reflexão de fissuras [Medina e Muñoz, 2004], contribuindo assim para o aumento da vida útil do pavimento. Neste sentido as misturas com um alto teor de borracha parecem ser mais vantajosas para aplicá-las na conservação de estradas.

Embora as empresas que produzem BMB em Portugal consigam misturas duráveis, nesse sentido, a RECIPAV, como incrementa maiores percentagens de borracha reciclada de pneus na produção das suas misturas betuminosas, consegue maiores percentagens de betume, conseguindo desse modo produzir misturas com maior durabilidade.

- **Maior resistência à fadiga/propagação de fendas**

Quando se adiciona a borracha ao betume quente, a borracha reage quimicamente com os maltenos (fracção volátil dos betumes), fixando-os e permitindo que o BMB apresente uma elevada elasticidade no tempo, quando comparado com os betumes convencionais. Associada a esta elevada elasticidade e à elevada percentagem de BMB nas misturas betuminosas, resulta uma camada com elevada resistência à propagação de fendas [RECIPAV, 2005]. Para comparação da resistência à fadiga entre uma mistura betuminosa com BMB e uma mistura betuminosa convencional, utilizou-se o ensaio de fadiga de acordo com a norma AASHTO TP 8-94. Os ensaios de fadiga executados em Portugal, elaborados com o apoio da RECIPAV, confirmaram os resultados obtidos nos Estados Unidos da América, e apresentam uma resistência à fadiga 10 vezes superior à de uma mistura convencional [RECIPAV, 2005]. Estes resultados advêm da alta viscosidade que as misturas produzidas pela via húmida, *in situ*, que conferem à mistura elevada elasticidade, traduzindo-se numa maior resistência à fadiga e propagação de fendas.

As misturas produzidas por via húmida, em fábrica, como têm presente uma viscosidade elevada (não tão elevada quanto as misturas fabricadas *in situ*), consegue-se também uma boa resistência à fadiga e propagação de fendas.

Independentemente do processo de fabrico do BMB, segundo estudos elaborados em vários países, as misturas com BMB, apresentam sempre uma maior resistência à fadiga e à propagação de fendas comparando com as misturas betuminosas convencionais.

- **Maior resistência ao derrame de combustíveis**

Foi realizado um estudo a pedido da empresa RECIPAV⁵⁸ à Universidade do Minho, com o objectivo de avaliar a influência do *diesel* no comportamento de três misturas betuminosas: microbetão betuminoso rugoso com betume modificado; mistura aberta com betume modificado com borracha; e mistura betuminosa rugosa com betume modificado com borracha. Os resultados obtidos nesse estudo, permitiram concluir que todas as misturas são afectadas pela presença do *diesel*. Em termos de resistência conservada as misturas com BMB

⁵⁸ [Recipav, 2005]

apresentam melhor desempenho comparativamente à mistura com betume modificado. Entre as misturas com BMB a aberta sofre menos efeito do *diesel* [Pais, 2005].

No entanto, existem misturas com betumes anti-querosene, concebidas para apresentarem uma maior resistência ao derrame de combustíveis. Este tipo de misturas utiliza-se apenas em espaços específicos, como por exemplo em aeroportos.

Como as misturas fabricadas *in situ*, podem incorporar maior percentagem de ligante, este factor permite que apresentem uma maior resistência ao derrame de combustíveis.

- **Melhores benefícios ambientais**

O aspecto ecológico e social deve ser reforçado como um benefício muito importante e adicional às melhorias que podemos observar na modificação do betume tradicional com a adição da borracha moída com pneus. Assim, podemos citar os seguintes gerados [Oda e Júnior, 2001]:

1. Aparecimento e fortalecimento de empresas especializadas na reciclagem de pneus para convertê-los em betume borracha;
2. Benefícios directos ao sector público pela criação de novas fontes de tributos a ingressar no erário público, e adicionalmente serão criados novos empregos directos nas empresas recicladoras e indirectos ligados ao processo de angariação e movimentação de pneus inutilizados;
3. Inibição maior aos focos de criação de insectos prejudiciais à saúde e até letais ao ser humano;
4. Redução da poluição visual causada pela rejeição de pneus em locais impróprios;
5. Diminuição do assoreamento de rios, lagos e baías, causados, em parte, pela indevida rejeição de pneus;
6. Diminuição do número de pneus usados em depósitos, com a consequente redução do risco de incêndios incontroláveis e a não deposição de pneus, sob qualquer formato, em aterros sanitários;
7. Redução da utilização de betume: pela maior durabilidade dos pavimentos.

As consequências ecológicas, económicas e sociais aliadas ao benefício técnico do novo betume criado com a borracha reciclada são muito interessantes e compõe um panorama muito benéfico para a sociedade. A durabilidade das nossas estradas pode ser incrementada com a utilização de um ligante com mais qualidade e melhores características fabricado com o resíduo reciclado dos pneus, contribuindo também para o benefício ecológico e social já exposto.

Segundo a Quercus⁵⁹, para que em Portugal não haja quaisquer dúvidas nos consumidores sobre a qualidade dos produtos provenientes de reciclagem de pneus, é fundamental que para algumas aplicações de borracha reciclada seja concluído um processo de

⁵⁹ [Quercus, 2005]

homologação/certificação. Isto é particularmente relevante no caso da aplicação de betume modificado com borracha reciclada na pavimentação de estradas. A introdução, nos cadernos de encargos das obras públicas, da obrigatoriedade de um consumo mínimo de produtos em borracha reciclada é uma medida fundamental para abrir mais mercado da borracha reciclada. A título de exemplo, na legislação espanhola já são dadas indicações claras para se optar pelos produtos em borracha reciclada.

A legislação existente sobre gestão de pneus usados consiste no Decreto-Lei n.º111/2001 de 6 de Abril que estabelece metas de gestão dos pneus.

- **Maior conforto e segurança dos utentes**

Todas as vantagens mencionadas anteriormente, contribuem de forma directa e/ou indirecta para que a estrada permita que os utentes circulem com um maior conforto e segurança.

O BMB melhora as características estruturais e superficiais. No entanto, o melhoramento e prolongamento das características superficiais, tais como a resistência à derrapagem, conferida pela textura superficial (rugosidade) e condições de drenagem de águas superficiais, contribuem de forma directa para o conforto e segurança dos utentes da estrada.

As camadas de desgaste com BMB apresentam um atrito superior aos materiais convencionais pois permitem a utilização de granulometrias mais abertas (melhora a macro textura).

Assim, conclui-se que a incorporação da borracha no betume pode influenciar as características intrínsecas da mistura, todavia a composição granulométrica é que atribui à mistura a macrotextura e a microtextura, características fundamentais que proporcionam de uma forma directa o conforto e segurança dos utentes da estrada

- **Redução dos custos de manutenção dos pavimentos**

As excelentes propriedades mecânicas, nomeadamente elevada resistência à fadiga, elevada resistência à propagação de fendas e paralelamente elevada resistência às deformações permanentes e uma óptima impermeabilização, são factores que contribuem para que não seja necessária uma manutenção tão exaustiva comparativamente com a manutenção de pavimentos com a aplicação de betumes convencionais.

4.9.2 Desvantagens na Incorporação de Borracha nos Betumes

É evidente que a maior desvantagem de todas é o lato custo inicial (custos com a obtenção e adição da borracha) do betume modificado, não obstante se possa realizar uma análise do custo a longo prazo.

As dificuldades na obtenção do betume-borracha, assim como ter equipamento apropriado para controlar as propriedades da mistura também contribuem para este tipo de betumes apresentar valores de custos mais altos.

Pode-se concluir que o elevado custo inicial pode ser compensado pela redução da manutenção futura e o aumento do período de vida útil do pavimento.

A elaboração da mistura, requer um especial cuidado, na medida em que se tem que adquirir ligantes compatíveis com a borracha e por vezes existe ainda a necessidade de recorrer à adição de outros

aditivos para controlar as propriedades da mistura. Assim, é necessário um controlo especial quando ao fabrico do BMB. A aplicação em obra das misturas com BMB, também deve ser realizada mediante certos procedimentos, de modo a evitar problemas futuros.

Tanto a temperatura do fabrico como a de aplicação é um factor de extrema importância, na medida que põe em causa as propriedades finais da mistura.

Apesar da ocorrência de defeitos na superfície de alguns pavimentos, de uma maneira geral os resultados têm sido positivos. Os principais defeitos relatados são a exsudação e as fissuras por contracção de origem térmica, associados principalmente, à dosagem inadequada do teor betume-borracha (BMB) [Heitzman, 1992].

Quando comparado com o ligante convencional, pode-se verificar que a quantidade de betume-borracha necessário para uma determinada mistura é maior, o que justifica o problema da exsudação, mas ao mesmo tempo proporciona uma maior durabilidade á mistura betuminosa.

Para se obter melhores resultados as misturas com BMB devem ser aplicadas em superfícies pouco empenadas. A sua aplicação sobre bases tratadas com cimento tem resultados bastante satisfatórios, no entanto, em superfícies com muitas irregularidades, as misturas BMB devido à sua elasticidade/flexibilidade, acompanham essas irregularidades. Para fazer face a esse problemas deve-se recorrer ao reperfilamento prévio do pavimento antes da camada com BMB.

Os betumes modificados com borracha, apesar de possuírem características de desempenho superiores aos betumes tradicionais, também podem apresentar problemas de envelhecimento durante o fabrico e ao longo da sua vida útil [Júnior, 2004]. Assim, para minimizar a oxidação do betume, mas também prevenir a degradação da própria borracha, a temperatura de fabrico não deve exceder os 200 °C.

De salientar, que a perda de componentes voláteis durante o aquecimento na fase de construção, também contribui para uma perda prematura da capacidade de deflectir [Motta *et al.*, 1993].

4.10 Registo de Desempenhos

Ainda que este produto seja uma novidade em Portugal a sua aplicação em outros países já é muito vasta. Existem já especificações e processos construtivos bem como meios de dimensionamento que permitem uma confiança absoluta quanto ao seu uso, propriedades e desempenho previsível [RECIPAV, 2005].

Em Portugal, empresas como a CEPESA, a GALP, a LUSASFAL, a RECIPAV e a REPSOL, têm desenvolvido o BMB. No entanto, como não existem especificações em Portugal, em relação ao BMB, várias entidades têm acompanhado a produção e as aplicações do BMB. A monitorização do comportamento das misturas com BMB após aplicação, também está a ser realizada, com o intuito de contribuir para o estabelecimento de especificações relativas a esse tipo de misturas betuminosas devidamente adaptadas às condições portuguesas.

Os Estados Unidos da América têm vindo a aplicar o BMB na construção e conservação de estradas com bastante êxito. Nos estados do Arizona, Califórnia, Florida e Texas, nos Estados Unidos, o uso de betumes modificados com borracha está muito difundido quer para manutenção preventiva, quer em

camadas estruturais ou em revestimentos. A sua aplicação na África do Sul e na Austrália também é muito ampla.

O Departamento de Transportes da Califórnia vem utilizando de forma sistemática o BMB por via húmida e desde 1987 as espessuras das camadas betuminosas com borracha, têm sido reduzidas em relação às necessárias para pavimentos convencionais. Também reporta que em termos gerais os pavimentos em BMB, possuem um bom desempenho, requerendo menos manutenção e tolerando deflexões superiores àquelas suportadas pelos pavimentos flexíveis convencionais.

A performance de um pavimento é analisada e avaliada por rotina através do sistema de gestão da manutenção de pavimentos nos diversos departamentos de transportes nos Estados Unidos. Durante esse período, têm sido registados e estudados vários estados dos pavimentos como a percentagem de fissuração, cavados de rodeira, irregularidade longitudinal, custos de manutenção e resistência à derrapagem (atrito). Com base nessa informação e atendendo às propriedades físicas do BMB, conclui-se que existiu uma redução significativa das fissuras reflectidas pela base do pavimento.

A análise entre pavimentos tradicionais e pavimentos com BMB, resultou que os pavimentos com betumes convencionais atingiram a ruína ao fim de 12 anos e os pavimentos com BMB ainda estão longe desse estado o que se traduz numa elevada economia em termos de custos com a conservação [RECIPAV, 2005].

Devido aos gradientes térmicos existentes no estado do Arizona os pavimentos estão, em muitos casos, sujeitos ao fenómeno de fadiga térmica devido ao gradiente térmico (temperaturas entre -10°C a 45°C). Em Portugal esse fenómeno não se verifica pelo que deverão ser esperados estados de fendilhamento menores. Daqui poderá concluir-se que se uma mistura betuminosa com BMB funciona em termos de reflexão de fendas no Arizona, situação mais desfavorável, funcionará com toda a certeza em Portugal [RECIPAV, 2005].

Nos estudos referentes à resistência à formação de cavados de rodeira tem sido superior à esperada, esse facto pode estar associado à menor fissuração das estradas pavimentadas com misturas com BMB.

A RECIPAV⁶⁰ refere que entre os ensaios realizados ao seu BMB, destaca-se o ensaio à fadiga com resultados surpreendentes, em que se verificou que as misturas com BMB são cerca de 10 vezes melhores que as misturas betuminosas convencionais. É esta excelente capacidade de resistir à fadiga por flexão que permite que este material seja colocado em camadas de espessura reduzida quando comparado com misturas betuminosas convencionais.

As outras empresas, como a CEPESA, a GALP, a LUSASFAL e a REPSOL, são unânimes quanto ao desempenho das misturas com BMB. Estudos elaborados, ao BMB, indicam excelentes propriedades de resistência a deformações permanentes e ao envelhecimento, além de estarem dotadas de uma excelente adesividade aos agregados.

⁶⁰ [Recipav, 2005]

4.11 Análise Custo-Benefício

A decisão quando e como empregar o BMB deve ser baseada em relações custo-benefício considerando os custos e prazos de construção e as expectativas de desempenho durante o período de vida útil de uma estrada. Atendendo às propriedades do BMB, deverão ser correctamente avaliadas as estruturas do pavimento de forma a obter-se uma solução que, em termos de custos de construção, seja equiparada com as soluções convencionais [RECIPAV, 2005].

À partida, as misturas com BMB apresentam custos mais elevados em relação às misturas convencionais. Esses custos mais elevados por tonelada necessitam de ser comparados com o custo total, equiparado em termos estruturais, da utilização das misturas betuminosas convencionais ou outras técnicas convencionais, com espessuras muito superiores às misturas com BMB. Na comparação de custos deverá ainda ser considerado o custo com a conservação durante o período de vida útil do pavimento que, segundo a experiência do Departamento de Transportes do Arizona, é cerca de 2/3 menor para as misturas betuminosas com BMB [RECIPAV, 2005]. Isso deve-se às propriedades próprias do BMB, como a resistência à fadiga que diminui as campanhas de conservação.

O custo do BMB diminuiu substancialmente desde que as patentes expiraram. Nos Estados Unidos da América, o custo é quase metade de o que era em 1985 [Asphalt Org., 2005].

De referir, que o processo de obtenção da borracha também contribui para elevar o preço do BMB. O processo de trituração criogénico apresenta custos de produção elevados, devido à utilização de nitrogénio, contudo a borracha proveniente da trituração ambiental, são mais económicas a nível de produção, mas requerem um maior consumo de tempo e energia de modificação.

O custo também tem que ser visto segundo uma perspectiva ecológica. A utilização de borracha de resíduos de pneus no betume, vem solucionar problemas e custos relacionados com os depósitos de milhares de pneus

Como a aplicação das misturas com BMB, pode ser efectuada com espessuras mais reduzidas, devido às suas características especiais, diminui a necessidade de recorrer a materiais granulares. Essa diminuição também ocorre a nível de transporte e a nível de gastos energéticos no fabrico da mistura. O que significa que o BMB tem um inegável benefício ecológico, que muitas vezes não é contabilizado, assim o seu custo é plenamente justificável perante o seu benefício.

A necessidade de se compatibilizar o betume convencional para receber a modificação, por meio de determinados aditivos e o custo industrial da modificação podem onerar o custo do BMB em relação ao preço do betume convencional. Mas este custo a mais é plenamente justificável perante o seu benefício [Júnior e Greca, 2003].

4.12 Conclusões

A busca de alternativas para a construção e reabilitação de estradas é imperativa, dada a escassez de materiais naturais e dado o aumento de custos dos materiais de construção.

O aproveitamento de resíduos na composição de novos materiais é uma tendência mundial que vem crescendo rapidamente em todos os ramos da actividade económica e contempla a redução de custos, importando, por vezes melhorias, facilidades técnicas e operacionais.

Devido a essas crescentes preocupações ambientais, tem-se questionado a respeito do destino ou deposição de pneus inutilizáveis. O reaproveitamento destes pneus constitui um desafio muito importante em todo o mundo, dadas as suas peculiaridades de durabilidade, quantidade, volume e peso e principalmente, grande dificuldade em atribuir-lhes um destino ecológico e economicamente viável [Martins, 2004].

Face às exigentes metas de valorização dos resíduos que cada país da União Europeia tem estabelecido normativas ambientais, a utilização de pneus usados na pavimentação de estradas é sem dúvida uma forma viável de cumprir o especificado.

Há cerca de quatro décadas, que têm sido realizadas pesquisas com o intuito de produzir misturas betuminosas, menos sujeitos às variações climáticas, mais resistentes à acção do tráfego, de maior durabilidade e, por consequência com baixos custos de manutenção.

A durabilidade das estradas pode ser incrementada com a utilização de um ligante com mais qualidade e melhores características, fabricado com resíduos de pneus, contribuindo paralelamente para um benefício ecológico e social já exposto.

De uma forma resumida, o BMB consiste na transformação de um betume incorporando-lhe granulado de borracha. O produto obtido ostenta uma série de propriedades físicas e reológicas superiores às existentes em betumes não modificados.

Para se modificar um betume existe uma série de critérios a ter em consideração para que a mistura seja fabricada com sucesso.

O segredo de uma modificação de qualidade reside sobretudo na compatibilidade entre o betume base e o agente modificador (granulado de borracha reciclada de pneus). Essa compatibilidade é determinante durante o transporte, armazenamento e aplicação.

Para obter BMB, existem 3 métodos de fabrico: via húmida, via seca e via mista. O método por via húmida é dos mais utilizados e pode ser dividido em duas vertentes de fabrico: fabrico *in situ*/central betuminosa e fabrico em fábrica/refinaria.

Existem importantes diferenças de produtos dependendo do tipo de fabrico e do método escolhido para a obtenção do granulado de borracha (trituração criogénica e trituração ambiental). Assim consoante o processo de fabrico, obtêm-se misturas betuminosas, com características diferentes e consequentemente com objectivos de aplicação diferentes.

Em Portugal, todas as empresas recorrem ao método por via húmida para obter o BMB. Todavia, a CEPESA, a GALP, a LUSASFAL e a REPSOL fabricam os seus betumes em fábrica/refinaria, e a RECIPAV *in situ*.

O BMB de pneus reciclados, produzido em fábrica apresenta uma baixa percentagem de granulado de borracha (8 a 15% em relação à massa total do ligante) e soa estáveis ao armazenamento. Quanto ao BMB de pneus reciclados, fabricado em *in situ* apresenta uma maior percentagem de granulado de borracha (superior a 18% em relação à massa total de ligante) e não são estáveis ao armazenamento.

As misturas com BMB têm um vasto campo de aplicação. A aplicação de misturas com BMB de pneus reciclados, incluem os trabalhos de conservação periódica, tais como selar juntas e fendas, interfaces anti-propagação de fendas, misturas betuminosas a quente e revestimentos superficiais.

Pode-se recorrer à aplicação de misturas com BMB em trabalhos de reabilitação, melhorando as características superficiais e estruturais do pavimento e em construção de novas estradas.

Dentro de várias técnicas de fabrico de BMB, dever-se-á escolher a que melhor se adequa ao(s) problema(s) que se tem que resolver em projecto ou em obra, tendo em conta os custos associados.

A aplicação dos betumes modificados com borracha é aconselhável em casos específicos, quando as propriedades dos ligantes tradicionais são insuficientes para garantir o sucesso. Ou seja, dever-se-á recorrer ao BMB em detrimento das misturas com ligantes tradicionais quando, existe a necessidade de responder a exigências como: tráfego elevado, temperaturas extremas ou agentes atmosféricos muito variáveis, tipologia das camadas inferiores sobretudo a do solo de fundação e benefícios ambientais.

O betume-borracha, ainda sob estudos e análises realizados demonstrou ter diversas vantagens em relação aos betumes tradicionais. Os resultados obtidos evidenciam a necessidade de aprofundar o percurso teórico e tecnológico para o estudo da reologia e classificação dos betumes modificados com borracha de pneu, à escala de laboratório, com o objectivo de evidenciar e melhor caracterizar as prestações e notáveis potencialidades de tais betumes.

É importante dispor especificações relativas ao emprego de borracha de pneus reciclados em misturas betuminosas. Essas especificações devem apresentar critérios para a selecção e uso de granulado de borracha e a sua doseificação, fabrico, colocação em obra e controlo de qualidade nas unidades de fabrico para conseguir os benefícios potenciais desta técnica.

Actualmente, existem várias entidades nacionais que mediante resultados de estudos e análises realizados durante o fabrico e aplicação do BMB, pretendem estabelecer especificações relativas a esse tipo de produto, de modo a se adaptarem às condições portuguesas.

Para concluir, o BMB produz misturas betuminosas que permitem combinar objectivos por vezes difíceis de conciliar: criar e manter as melhores infra-estruturas de transporte e preservação do meio ambiente.

Capítulo 5

CASO DE ESTUDO

5.1 Introdução

Actualmente a E.N. 119, apresenta um pavimento com diversas patologias, que afectam a condução dos utentes, justificando um projecto de reabilitação.

O projecto de beneficiação da E.N. 119, foi elaborado pela E.P. – Estradas de Portugal, E.P.E. – Direcção de Estradas de Santarém, com o intuito de atribuir-lhe as características iniciais para fazer face ao acréscimo de tráfego que se tem vindo a verificar e às demais solicitações.

O projecto foi realizado com base numa campanha de caracterização da situação actual de toda a envolvente da estrada, não se baseando apenas na análise do pavimento.

O projecto da E.N. 119 compreende o estudo de um conjunto de sistemas que directamente ou indirectamente também contribuem para originarem e desenvolverem um vasto campo de degradações. É a análise global de todos os componentes da estrada que ajudam a decidir se a estrada necessita de reabilitação e que tipo de reabilitação é a mais adequada.

Como já foi referido nesta dissertação, existem diversas técnicas de reabilitação de pavimentos. Para a reabilitação da E.N. 119, a RECIPAV conjuntamente com Barros⁶¹ elaboraram um estudo comparativo entre 2 possíveis soluções (1 e 2). Essas soluções consistiam no seguinte:

Solução 1 - Reforço do pavimento recorrendo a misturas betuminosas convencionais;

Solução 2 - Reforço do pavimento recorrendo a misturas betuminosas com BMB com alto teor de borracha.

Esses dois estudos foram analisados de modo a ajustá-los aos problemas encontrados na E.N. 119. Contudo a Direcção de Estradas, após análise desses dois estudos, concluiu que deveriam sofrer algumas alterações a nível estrutural, para se adaptarem aos problemas patentes na E.N. 119. Assim, esta instituição efectuou um outro estudo que se dividiu em mais duas soluções (3 e 4).

As soluções 3 e 4 contemplam mais uma camada de regularização que as soluções 1 e 2, de modo a dotar a estrada com as devidas inclinações.

⁶¹ [Barros, 2005]

Nesta dissertação, no ponto 5.7.2 (Análise de Custos das Soluções Projectadas), foi elaborado um estudo económico entre as quatro soluções de modo a se conseguir chegar à solução mais equilibrada em termos técnicos e económicos.

5.2 Descrição da Estrada Estudada

A E.N. 119 (Figura 5.1), constitui uma via de comunicação com grande impacto dentro da malha viária envolvente, pois assegura a ligação entre Coruche e a zona oeste (Lisboa e Setúbal).

No ano de 2005, ano de elaboração do projecto de execução da E.N. 119, abriu ao trânsito a A13. A abertura dessa auto-estrada, levou a que fosse atribuída à E.N. 119 um maior nível de importância, pois essa possibilita o acesso directo dos condutores vindos de este.

Constitui ainda um acesso privilegiado do concelho de Mora a Lisboa, bem como uma das alternativas para o concelho de Ponte de Sôr.

O projecto de execução de beneficiação da E.N. 119 iniciou-se ao km 23+300 (Infantado) e terminou ao km 48+125 (Monte da Barca), desenvolvendo-se numa extensão de 24 825 metros.

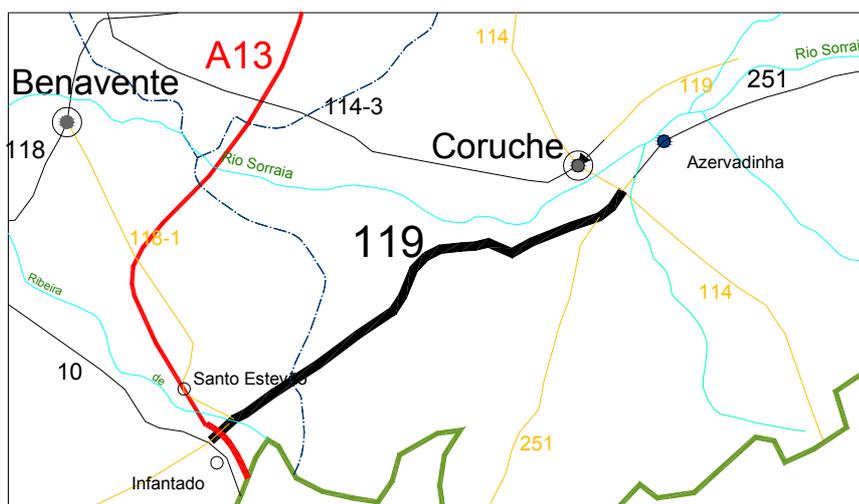


Figura 5.1 – Localização da E.N. 119 na rede viária envolvente

O troço da E.N. 119 em estudo, apresenta quer em planta, quer em perfil longitudinal, características aceitáveis. Contudo, o pavimento existente ostenta uma percentagem de fendilhação bastante elevada, permitindo a infiltração de águas, o que contribui para que ocorra uma degradação acelerada do pavimento. O envelhecimento do betume também é bastante visível, perdendo assim a estabilidade de ligação entre os diversos componentes contribuindo de forma directa para a rápida desagregação do material.

Todas as patologias existentes no pavimento da E.N. 119 se encontram num estado avançado de degradação, tornando-a incómoda e insegura, prejudicando a condução dos seus utentes. Assim, os trabalhos de beneficiação da E.N. 119 incidem-se fundamentalmente no reforço do pavimento existente.

Com base no mesmo âmbito da segurança dos condutores, o projecto prevê a rectificação da geometria de algumas intersecções, como a implantação de caixas de viragem, com os respectivos

melhoramentos dos raios de entrada e saída, tendo sempre em consideração as características mínimas recomendadas pelas Normas da finda J.A.E (Junta Autónoma de Estradas).

Também foi alvo de melhoramento, o sistema de drenagem existente. Por exemplo, a maioria das valetas existentes, são revestidas a betão e sob elas existem drenos de rebaixamento do nível freático. Uma grande percentagem desse sistema de drenagem encontra-se obstruído e destruído, contribuindo também para a degradação do pavimento. Para resolver as patologias do pavimento oriundas desse deficiente sistema de drenagem, ter-se-á que reconstruir a maior parte dos dispositivos de drenagem existentes e construir novos elementos de drenagem em locais indispensáveis.

Também está previsto o melhoramento do equipamento de sinalização e segurança, de modo a torná-lo mais eficaz e para estar em conformidade com o Decreto-Regulamentar n.º 22-A/98 de 1 de Outubro.

De referir, que o projecto foi elaborado, tendo em vista dotar o troço em estudo com características correspondentes à velocidade-base de 70 km/hora, objectivo plenamente conseguido em todas as secções, excepto nos atravessamentos das localidades.

5.3 Razões que Justificam o Projecto de Beneficiação da EN 119

Na última década, em Portugal, tem sido atribuída uma maior importância à construção de estradas, sendo a farsquia de recursos monetários menor para a conservação. Desta situação resultaram estradas com necessidade de intervenção urgente, pois apresentavam pavimentos em fase de ruína. Como a maioria das estradas não sofreram conservação com carácter preventivo, a reabilitação normalmente baseia-se no reforço da estrutura existente.

A E.N. 119 foi intervencionada várias vezes, todavia nos últimos 18 anos não sofreu intervenções de conservação com a periodicidade devida, isso é visível, nas patologias existentes, que atingiram um elevado grau de deterioração, inaceitáveis para uma estrada com a importância da E.N. 119, que não podem ser tratadas através de meras intervenções de conservação corrente.

Assim, a reabilitação justifica-se, sobretudo devido à existência em certos locais, de degradações inaceitáveis da estrutura do pavimento, de capacidade de carga insuficiente e por apresentar custos de conservação corrente muito elevados.

A reabilitação também se deve aos incómodos que a estrada imputa aos utentes, como os níveis de segurança inaceitáveis, níveis de comodidade insuficientes e custos intoleráveis (desgaste dos veículos).

5.4 Acções Desenvolvidas

Na tentativa de adoptar a medida de reabilitação mais ajustada ao caso em estudo, foram realizados vários procedimentos de análise do pavimento e da sua envolvente.

5.4.1 Recolha de Informação Disponível

A recolha de informação, como o ano em que a estrada foi construída, quantas intervenções foram realizadas após a sua construção, por que razão sofreu essas intervenções, quais os materiais utilizados, são fundamentais para realizar um projecto adequado às características da estrada em estudo.

A maior parte da informação obtida da E.N. 119 foi recolhida mediante pessoas que não estiveram envolvidas na sua construção, mas que no entanto, têm conhecimento de certos pormenores. Efectuou-se ainda uma pesquisa na Direcção de Estradas de Santarém, com o intento de descobrir o projecto inicial e/ou projectos de posteriores reabilitações. Tendo em conta o período de tempo decorrido, pode-se afirmar que se conseguiu obter informação bastante importante, a qual se apresenta de seguida.

- **Ano de construção da E.N. 119 e intervenções sofridas posteriores à sua construção**

Segundo informações obtidas mediante funcionários da Direcção de Estradas de Santarém a E.N. 119 foi executada antes do ano de 1946. Actualmente, existe um gráfico nesses serviços que indica que em 1946 a estrada estava com uma camada superficial em macadame de cimento.

Após essa data existem vários registos patentes no gráfico da E.N. 119, referentes a várias intervenções no sentido de melhorar as características superficiais, como se descrevem de seguida:

1. 1946 – Macadame de cimento;
2. 1960 – Revestimento superficial betuminoso;
3. 1966 – Recarga em macadame na espessura de 0,12 m e um revestimento superficial betuminoso.

Este último tratamento em 1966, após análise de documentos existentes na Direcção de Estradas de Santarém, verificou-se que foi realizado por troços e em períodos diferentes. Um dos troços da estrada em estudo (km 23+207 ao km 23+295), o tratamento superficial consistiu na colocação de argamassa betuminosa, mais semi-penetração betuminosa e gravilha de basalto. Quando foi executado o tratamento superficial foram também realizados pequenos alargamentos da faixa de rodagem, dos quais não existem quaisquer registos quanto à forma como foram executados, nem quanto à sua constituição.

A penúltima intervenção realizada na E.N. 119 foi realizada no ano de 1987. Essa intervenção teve como objectivo dotar a estrada com características superficiais e estruturais, que nessa altura deviam apresentar-se muito debilitadas. Não se encontrou o projecto de execução dessa beneficiação, no entanto, encontrou-se o processo de acompanhamento da obra, com mapas de quantidades, que possibilitam observar os trabalhos que se executaram.

Mais tarde, no ano de 1985 foi construída uma pequena variante com uma passagem superior sobre o caminho-de-ferro.

- **Tipo e estrutura do pavimento**

Não se conseguiram quaisquer dados relativos ao tipo e estrutura iniciais do pavimento, pois não foram encontrados registos. Contudo, foram realizadas sondagens à rotação de modo a conseguir amostras, que permitem a visualização e identificação dos materiais constituintes de cada camada. Esses resultados estão patentes no ponto 5.5 desta dissertação.

Tem-se conhecimento que foram executados vários tratamentos superficiais que alteraram a estrutura do pavimento inicial, do qual se desconhece a estrutura.

Sabe-se que a intervenção da E.N. 119, realizada em 1987, consistiu no seguinte:

1. Camada de desgaste em betão betuminoso (0/14 mm), com 0,05 m de espessura;
2. Camada de ligação em betão betuminoso (0/20 mm), com 0,05 m de espessura;
3. Camada de ligação em betão betuminoso (0/20 mm), com 0,07 m de espessura.

Também foi executada uma grande quantidade de saneamentos nos locais onde a estrada apresentava degradações que justificavam a sua execução.

- **Natureza do solo de fundação**

A natureza do solo de fundação foi adquirida através de poços de sondagem, realizados durante a execução do projecto de reabilitação actual. Foram abertos buracos, com uma área aproximada de 1m², dos quais foram retirados materiais correspondentes às várias camadas do pavimento até à recolha do solo de fundação.

Posteriormente, realizaram-se ensaios em laboratório, à amostra do solo de fundação com o intuito de classificá-los. Esses resultados serão descritos no ponto 5.5.9 desta dissertação.

- **Características iniciais dos materiais**

Esta informação é muito difícil de adquirir, tendo em consideração que não existe nenhuma documentação com o registo do ano em que a E.N. 119 foi construída, pelo que consequentemente não existem dados referentes à composição/espessura das camadas.

- **Tráfego**

Trata-se de outro dado muito difícil de conseguir, pois desconhece-se o projecto de execução inicial da E.N. 119. Contudo, actualmente tem-se conhecimento do tráfego que nela circula, permitindo realizar uma estimativa para os anos futuros.

Este ponto também será abordado na caracterização da situação existente (ponto 5.5.8).

- **Condições climatéricas da zona**

Portugal apresenta, na generalidade, um clima temperado. A Sul do Tejo fazem-se sentir as influências mediterrâneas, com Verões bastante quentes e prolongados, e Invernos curtos e de pouca pluviosidade.

O Manual de Concepção de Pavimentos da EP considera a influência da temperatura nas propriedades das misturas betuminosas, designadamente o efeito de temperaturas elevadas na

evolução de deformações permanentes resultantes da acção do tráfego. No manual está patente um mapa, que divide Portugal em três zonas climáticas: temperada, média e quente. Após análise desse mapa, verificou-se que a E.N. 119 se encontra numa zona média.

5.5 Caracterização da Situação Existente

A caracterização da situação existente não remete apenas para a análise individual do pavimento. A sua envolvente também tem que ser descrita, para se perceber até que ponto ela pode afectar o pavimento. Assim, com a caracterização do existente, tenta-se fazer o levantamento detalhado de dados relacionados com o traçado, com a drenagem, com o equipamento de segurança e particularmente com o pavimento. Com todos os dados recolhidos, torna-se possível chegar a um diagnóstico, para que posteriormente se possa seleccionar e projectar a medida de reabilitação mais ajustada.

Para a caracterização e para o levantamento de todos os dispositivos existentes ao longo dos cerca de 25 quilómetros foram realizadas diversas visitas ao campo.

5.5.1 Caracterização do Traçado em Planta

A estrada em estudo inicia-se no km 23+300, na actual rotunda do Infantado, nas proximidades da entrada da A13, e termina no 48+125, no cruzamento do Monte da Barca (Coruche).

A estrada passa por três pequenas localidades: Foros de Almada, Biscainho e Courelas da Amoreirinha.

Segundo, o actual projecto de beneficiação, o traçado em planta não sofreu alterações, pois verificou-se que a estrada, apresenta um traçado de um modo geral aceitável. A contribuir para esse facto, a orografia que permite que o traçado da E.N. 119 seja composto por uma percentagem elevada de alinhamentos rectos, cerca de 80%, sendo os restantes 20% referentes a alinhamentos curvos, com raios aceitáveis, permitindo que os condutores pratiquem uma condução cómoda e segura.

5.5.2 Caracterização do Traçado em Perfil Longitudinal

Em termos de perfil longitudinal, pouco há a referir, uma vez que o troço da E.N. 119 desenvolve-se numa região onde a orografia é muito pouco acidentada, assim a estrada consequentemente está dotada de razoáveis características geométricas.

Através da observação visual, constatou-se, que os traneis têm desenvolvimento e inclinações aceitáveis.

As concordâncias das curvas côncavas e convexas apresentam valores aceitáveis, conferindo distâncias de visibilidade bastante razoáveis, tanto na condução nocturna como diurna.

5.5.3 Caracterização do Perfil Transversal Tipo

O actual perfil transversal tipo é constituído por uma faixa de rodagem com uma largura média de 7,00 metros e por bermas com cerca de 0,25 metros.

Verificou-se que a estrada, em recta, apresentava em muitas situações inclinação transversal insuficiente ou inexistente e em curvas, dependendo dos respectivos raios, é notório os desajustes das inclinações das sobrelevações.

Ao longo da E.N. 119, existem diversos pontões e obras de arte, nesses locais não existem estrangulamentos. A largura nesses pontos prossegue com as mesmas dimensões da plataforma.

A passagem pelas três localidades (Foros de Almada, Biscainho e Courelas da Amoreirinha), não altera o perfil transversal tipo. É notório que a estrada não passa pelos núcleos das povoações. As habitações existentes nos terrenos limítrofes, encontram-se em casos pontuais mais concentradas (no atravessamento das povoações), mas na maioria dos casos estão dispersas. Assim, não se sentiu a necessidade de dotar a estrada nesses locais com características urbanas (por exemplo, implantação de passeios).

5.5.4 Caracterização das Ligações, Serventias, Gares e Paragens de Autocarro

Os pontos de conflito mais importantes necessitarão de algumas correcções, pois não ostentam espaço, nem geometria adaptados para realizar as manobras de viragem com a devida segurança.

Existem cruzamentos que não se encontram dotados de ilhéus, separadores de tráfego. Em plena via da E.N. 119 apurou-se ainda a necessidade de implantar caixas de viragem, para os condutores que pretendam efectuar manobras de viragem o façam com mais segurança.

No Monte da Barca (km 48+125), existe actualmente um cruzamento, que mereceu uma especial atenção. Actualmente nesta ligação estão implantados elementos do sistema semafórico, colocados nos ilhéus, que são frequentemente danificados pelos veículos, em especial os pesados, tornando-o por isso inoperacional. Também está situado numa zona, onde existem frequentes quedas de tensão na rede de abastecimento de energia, que tem como consequência um descontrolo do sistema semafórico, acabando por passar à situação de intermitente. Este cruzamento torna-se assim muito dispendioso a nível de conservação/manutenção.

Também se verificou, que nem todas as ligações estavam munidas com equipamento de segurança de acordo com o Decreto-Regulamentar n.º 22-A/98 de 1 de Outubro.

Ao longo dos 25 quilómetros da E.N. 119, são inúmeros os casos de acessos e/ou serventias a propriedades agrícolas, comércio e a habitações.

Com base na caracterização visual, analisou-se o grau de utilização desses acessos, e concluiu-se que existe a necessidade de os manter em funcionamento.

Constatou-se a existência de algumas gares de paragem, as quais não se encontravam revestidas com qualquer tipo de revestimento betuminoso (camada de desgaste em betão betuminoso).

Quanto à situação das paragens de autocarro, observou-se que existem tanto dentro das povoações como fora destas. A maior parte encontra-se implantada com as dimensões normalizadas e dotadas de um pequeno separador.

5.5.5 Caracterização do Sistema de Drenagem

A drenagem da estrada em estudo tem sido garantida pelos diversos órgãos existentes, os quais, no âmbito deste estudo, foram objecto de cuidada caracterização que incluiu um reconhecimento em campo cuidado.

O deficiente estado de conservação e manutenção em que se encontravam certas partes do troço, no que se refere a bermas e terrenos marginais, dificultou os trabalhos de campo, tendo mesmo em certos casos impossibilitado a detecção de possíveis órgãos de drenagem, todavia a maior parte foi detectada.

1. Drenagem transversal

As linhas de água existentes encontravam-se, de um modo geral, bastante assoreadas e, em certos casos, cobertas com vegetação densa, nas imediações das entradas e saídas das passagens hidráulicas.

A E.N. 119 atravessa diversas ribeiras e linhas de água cujas bacias hidrográficas são de reduzida dimensão, excepto no atravessamento da ribeira de Santo Estêvão que é realizado através de duas pontes, uma delas com 120 metros e outra com 87 metros. Na beneficiação da E.N. 119, não esteve em causa a reabilitação destas pontes, devido a essas terem sofrido uma intervenção profunda pouco tempo antes da realização do projecto de execução da beneficiação da E.N. 119.

O atravessamento das restantes ribeiras e linhas de água é realizado através de diversos pequenos pontões e de diversas passagens hidráulicas, em manilhas de betão com diâmetros normalizados e em estruturas em pedra ou em alvenaria de tijolo com secção rectangular.

Para além do deficiente funcionamento devido à falta de limpeza, as características dos terrenos adjacentes não ajudam, uma vez que facilitam o transporte e sedimentação de material ao longo das linhas de água, e contribuem também de forma significativa para o funcionamento ineficaz das passagens hidráulicas que dão continuidade às linhas de água.

Contribui também de forma significativa a inexistência de passagens que dêem continuidade a certas linhas de água.

2. Drenagem superficial e interna

O sistema de drenagem superficial tem sido assegurado de uma forma deficiente, pelos órgãos de drenagem transversal e longitudinal. Alguns desses órgãos encontram-se mesmo num estado de conservação lamentável, o que significa que em alguns pontos o escoamento das águas não se efectua, e a água fica retida no pavimento e/ou fica estagnada durante longos períodos nas valetas e em valas existentes nos terrenos confinantes com a estrada.

A drenagem longitudinal funciona de um modo ineficiente, pois as valetas em betão de secção triangular, encontram-se em alguns locais obstruídas, ou ainda interrompidas por um ou outro acesso que não lhe deu continuidade, obrigando assim a que o escoamento se faça junto ao pavimento. Existem outros casos, em que as valetas se encontram

bastante danificadas, permitindo a infiltração de águas que podem atingir a zona do pavimento.

Os drenos de rebaixamento existentes sob as valetas revestidas estão totalmente colmatados, isso comprovou-se na inspecção visual realizada nas eventuais saídas dos drenos.

5.5.6 Caracterização do Equipamento de Segurança

Também no aspecto de sinalização e segurança foi feito um reconhecimento dos dispositivos existentes e da sua eficiência global, ao longo dos 25 quilómetros de extensão do troço a beneficiar.

No que se refere à sinalização vertical, apurou-se que a maioria dos sinais se encontram com as dimensões normalizadas, contudo encontram-se degradados e obsoletos por não estarem em conformidade com o Decreto-Regulamentar n.º 22-A/98 de 1 de Outubro.

O troço em estudo apresenta sinalização vertical do código da estrada com sinais direccionais, setas direccionais, diversos painéis de informação de limite de concelho, localidade entre outros. Verificou-se que a articulação da sinalização vertical com a horizontal tem que ser melhorada no que respeita à permissão ou proibição de ultrapassagem. A sinalização horizontal, para além de não se encontrar em condições aceitáveis irá ser destruída após reforço do pavimento, pelo que terá que ser reformulada na sua totalidade.

De salientar o facto, de existir um diminuto número de passadeiras na travessia das localidades, situação que ficou registada para ser considerada no projecto de execução.

Quanto à existência de guardas de segurança, elas existem, mas em quantidades muito escassas. Existem muitos locais com alturas iguais ou superiores a 3 metros em que não estão implantadas guardas de segurança, foram também detectadas passagens hidráulicas que não estão munidas com as referidas guardas de segurança. Quantos às guardas de segurança de protecção para motociclistas são inexistentes.

Na inventariação efectuada, pôde-se verificar a existência de demarcação quilométrica e hectométrica, realçando o facto de ser pouco notória, devido à existência de muita vegetação em seu redor.

5.5.7 Serviços Afectados

Ao longo do traçado da E.N. 119 existem diversos serviços, que em princípio não serão afectados, dado que a estrada não vai sofrer alargamentos do pavimento. Porém, quando se proceder aos trabalhos de beneficiação, nos entroncamentos e cruzamentos existem serviços e infra-estruturas que poderão ser afectadas.

5.5.8 Caracterização do Tráfego

O estudo de tráfego realizado, baseou-se na análise de contagens de tráfego da E.P. – Estradas de Portugal, E.P.E. disponíveis, tendo sido considerado o posto de recenseamento n.º 562 C, localizado

ao km 23+000 (perto da ligação do Infantado), revelando-se bastante útil na análise efectuada, o qual ajudou a caracterizar a evolução do tráfego (Quadro 5.1) na zona.

Ano	2001	2002	2003
TMD _A	3922	4243	4307
TMD _P	582	187	167
Legenda: TMD _A - Tráfego médio diário anual TMD _P - Tráfego médio diário anual de veículos pesados			

Quadro 5.1 – Valores de tráfego na E.N. 119⁶²

5.5.9 Caracterização do Pavimento Existente

A análise do estado do pavimento não se baseia numa simples observação. Para se conseguir detectar as anomalias existentes a inspecção foi realizada a pé. Durante essa jornada, elaborou-se um registo do estado do pavimento, assinalando as patologias presentes e a sua possível origem. De apoio à observação visual, foi levada uma câmara fotográfica, que possibilitou examinar os registos em gabinete com um maior pormenor.

Durante essa campanha de observação visual do pavimento da E.N. 119 verificou-se que existiam indicadores que denunciavam problemas internos, assim procedeu-se à caracterização estrutural baseada na apreciação da capacidade de carga do pavimento, através de ensaios de carga com o deflectómetro de impacto.

Com base nos resultados, a E.N. 119 foi dividida em zonas mais homogéneas. Depois prosseguiu-se com um plano de prospecção a cada uma dessas zonas, executando sondagens à rotação e poços de inspecção, com o objectivo de complementar a análise, auxiliando o reconhecimento de algumas das causas das degradações.

Os elementos obtidos através das técnicas de observação superficial e estrutural servirão de apoio ao estudo de dimensionamento das estruturas a projectar para o pavimento da E.N. 119.

5.5.9.1 Observação Visual com Apoio Fotográfico

Um estudo de caracterização do pavimento engloba um levantamento detalhado das anomalias patentes tanto na sua superfície como no seu interior.

Para detectar as anomalias superficiais, a observação deve ser muito pormenorizada. Com essa observação, conseguem-se detectar problemas internos através de indícios existentes na superfície.

O levantamento da caracterização do pavimento existente foi realizado com bom tempo, assim, não se conseguiu detectar outras disfuncionalidades do pavimento e da drenagem que prejudicam o pavimento, que só são possíveis de detectar com o tempo de chuva.

⁶² Fonte: [E.P., 2005]

O levantamento foi realizado a pé com o intuito de registar por quilómetro todas as anomalias encontradas em gráficos adequados e em fotografias. Os dados obtidos serviram para se efectuar uma posterior análise em gabinete.

Para a auscultação visual adoptou-se como critério a observação da seguinte gama de degradações:

1. Fendilhamento;
2. Deformações;
3. Desagregações superficiais;
4. Movimento de materiais.

Após avaliação das características superficiais da E.N. 119, conclui-se que poderia apresentar degradações mais expressivas, perto da ruína, considerando as poucas intervenções de conservação de que foi alvo nos últimos 18 anos.

As degradações de maior relevo verificaram-se em zonas pontuais. A degradação que está constante em toda a extensão da estrada em estudo é o envelhecimento do betume (Figura 5.2).



Figura 5.2 – Envelhecimento do betume

De seguida, apresentam-se, de uma forma resumida, as degradações observadas ao longo do troço da E.N. 119. Essas degradações foram registadas, com a indicação dos quilómetros num gráfico adequado. De apoio a este registo foram tiradas diversas fotografias.

- **Fendilhamento**

É o tipo de degradação mais presente na superfície do pavimento. O fendilhamento resulta sobretudo da fadiga dos materiais das camadas betuminosas sujeitos aos frequentes esforços de tracção por flexão. Porém, existem outras causas que dão origem a este tipo de patologia. Na E.N. 119, esta patologia está presente ao longo dos 25 quilómetros, mas é mais notória essencialmente nas zonas de aterro, devido à falta de capacidade do solo de fundação.

As fendas de fadiga observadas estavam patentes no eixo e por vezes nas zonas dos rodados dos veículos. Algumas dessas fendas encontravam-se isoladas, contudo apresentavam indícios de início de ramificação.

As fendas longitudinais existentes no eixo podem ser originárias da construção deficiente da junta longitudinal de construção.

A E.N. 119 exhibe sub-trechos, em que se observou a diferenciação da colocação de diferentes camadas superficiais (Figura 5.3). Essa diferença, existe devido ao facto dos métodos construtivos utilizados serem desadequados e/ou devido à deficiente qualidade dos materiais utilizados.



Figura 5.3 – Distinção entre a colocação de diferentes camadas de desgaste

Na transição dessas camadas residem fendas transversais, que denunciam a deficiência da colocação das camadas ou até mesmo a má execução da concordância entre elas.

Muitas fendas, como as de fadiga, transversais e longitudinais, em muitas zonas, evoluíram e formaram grandes áreas de pele de crocodilo (Figura 5.4). Esta patologia torna-se mais evidente no troço da passagem superior sobre o caminho-de-ferro, situada entre o km 46+000 e o km 47+000.



Figura 5.4 – Pele de crocodilo/ninhos

- **Deformações**

Na observação realizada à E.N. 119, as deformações evidenciaram-se fundamentalmente nas zonas de aterros.

O motivo que origina o aparecimento desta patologia está relacionado com a falta de capacidade das camadas e/ou do solo de fundação. As actuações simultâneas do tráfego e das acções climáticas contribuem para uma degradação mais acelerada do pavimento.

As deformações (Figura 5.5) encontradas estavam na maioria dos casos associadas à existência de outro tipo de patologia como a pele de crocodilo.



Figura 5.5 – Abatimentos e pele de crocodilo

As deformações, especialmente os abatimentos, na E.N. 119 justificam-se devido sobretudo à infiltração de água no corpo interno dos aterros.

De referir, que existe um problema patente na E.N. 119, que é a falta de inclinação transversal (2,5%) para o exterior em alinhamento recto. Este problema deve ser considerado como patologia, pois em zonas em que a inclinação chega a ser nula, a água que cai sobre o pavimento não se escoa eficazmente.

Ao lado da plataforma da estrada, na zona de aterros, existiam valas com água estagnada, o que prejudica de uma forma atroz o pavimento.

Os abatimentos como têm geralmente outro tipo de patologias associadas, fazem com que o escoamento das águas superficiais do pavimento se realize, dando hipótese a que as águas aí existentes se infiltrem.

Quanto à existência de rodeiras na E.N. 119 verificou-se muito reduzida comparativamente com outro tipo de degradações existentes.

- **Desagregações**

As desagregações traduzem-se na fragmentação, sobretudo da camada de desgaste. Com o passar do tempo, a mistura betuminosa perde as características que conferem estabilidade de ligação entre os agregados constituintes.

Na E.N. 119 verificam-se alguns casos onde existem desagregações, especialmente em zonas onde ocorre pele de crocodilo e ninhos, que se consideram o estágio final do processo de degradação. A presença de água nestes locais contribui para que esse estágio final ocorra com uma maior rapidez.

As desagregações existentes na E.N. 119 são consequência das degradações anteriormente referidas.

- **Movimento de materiais**

Só em locais muito pontuais é que se encontrou este tipo de patologia.

A subida de finos provém da actuação simultânea de uma deficiente drenagem com a circulação de veículos. O pavimento sofre compressões que levam a que as águas retidas nas camadas inferiores aflorem à superfície transportando os finos, contribuindo assim para um enfraquecimento estrutural do pavimento.

O envelhecimento do ligante contribui para a diminuição das características superficiais. Essa situação é mais evidente em zonas em que ocorre a desagregação dos materiais

Um problema que foi observado em quase toda a extensão da estrada foi a existência de árvores, nomeadamente pinheiros. As árvores existentes na zona confinante à plataforma da estrada põem em perigo a circulação dos utentes em dois aspectos: o primeiro está relacionado com o crescimento e desenvolvimento das árvores e conseqüente crescimento das suas raízes. As raízes desenvolvem-se e atingem a estrutura do pavimento. Uma vez dentro da estrutura, as raízes expandem-se e originam fendas e ondulações que se expandem e se transformam em patologias muito severas, pondo em causa a condução dos utentes. O segundo aspecto está relacionado com o facto das árvores constituírem um obstáculo, em caso de desvio dos condutores para fora da plataforma. Essa situação pode ser resolvida com o recurso a guardas de segurança.

5.5.9.2 Ensaios de Carga com o Deflectómetro de Impacto

Para se avaliar a capacidade estrutural do pavimento da E.N. 119 foi realizada uma campanha de ensaios de carga com o deflectómetro de impacto [Barros, 2005]. Os ensaios de carga com deflectómetro de impacto (FWD - Falling Weight Deflectometer), permitem, por um lado, detectar, ao longo do lanço em questão, zonas com diferentes comportamentos estruturais e, por outro, definir características de deformabilidade representativas dos materiais das diferentes camadas e da fundação do actual pavimento. Os ensaios foram realizados de 100 em 100 metros, alternadamente em cada uma das vias de circulação, tendo como objectivo:

1. A demarcação de zonas homogéneas em termos de capacidade de carga do pavimento existente;
2. A aquisição de elementos que sirvam de base à definição de um modelo de comportamento estrutural do pavimento de cada um dos sub-trechos estabelecidos.

O deflectómetro de impacto é um equipamento que permite a realização de ensaios de carga, através da aplicação de uma solicitação na superfície. Depois regista-se, em diversos pontos (7 pontos) os deslocamentos verticais (deflexões) aí ocorridos em resultado da aplicação dessa solicitação. Esta é originada pela queda de uma massa de uma dada altura, sendo transmitida ao pavimento através de uma placa circular com 30 cm de diâmetro [Barros, 2005].

As referidas deflexões são medidas, no meio da placa (df_0) e as distâncias, do meio, de 300 (df_1), 450 (df_2), 600 (df_3), 900 (df_4), 1200 (df_5), 1500 (df_6) e 1800 (df_7).

Na realização do ensaio, a distância, em cada via foi de 200 metros, tendo sido aplicada uma força de 65 kN, em pontos localizados, ao longo das rodeiras externas, devido a serem pontos mais desfavoráveis. Como já foi referido anteriormente, os ensaios foram realizados em ambos os sentidos

do troço em estudo, em pontos localizados ao longo das rodeiras externas, por serem esses os alinhamentos mais desfavoráveis.

- **Zonamento**

A partir dos resultados obtidos com os ensaios de carga, procedeu-se à sub-divisão do lanço em estudo em zonas homogéneas, em termos de comportamento estrutural do pavimento existente. Essa divisão consegue-se à custa dos valores das deflexões máximas registadas que se dividem em intervalos estatisticamente homogéneos. Considerando a distribuição ao longo da estrada em estudo, dos resultados dos ensaios efectuados, obtêm-se para efeitos do estabelecimento de um plano de prospecção, os seguintes sub-trechos patentes no Quadro 5.2.

Sub-trecho	Km Inicial	Km Final	Deflexão Característica (μm)
1	24+260	32+500	381
2	32+500	35+500	593
3	35+500	38+600	380
4	38+600	48+400	593

Quadro 5.2 – Valores de tráfego na E.N. 119⁶³

5.5.9.3 Plano de Prospecção

A divisão da estrada em sub-trechos, foi obtida em termos de resultados do ensaio de carga com o deflectómetro de impacto, permitindo definir um plano de prospecção, tendo em vista:

1. A verificação da constituição do pavimento (espessura e natureza das várias camadas constituintes) e da natureza da fundação;
2. A Determinação de baridades e teores em água *in situ* nos solos de fundação;
3. A recolha de amostras dos solos de fundação e dos materiais constituintes das camadas granulares, tendo em vista a realização de ensaios laboratoriais.

- **Sondagens à rotação**

A definição do plano de prospecção teve em atenção os locais representativos do comportamento estrutural de cada sub-lanço e a obtenção de uma distribuição uniforme dos trabalhos ao longo do traçado. Nesse seguimento, o Quadro 5.3 apresenta os locais onde se efectuaram as sondagens à rotação.

⁶³ Adaptado de [Barros, 2005]

Carotes	Lado	Km
1	Esquerda	24+500
2	Direita	26+500
3	Esquerda	28+500
4	Direita	30+500
5	Esquerda	32+500
6	Direita	34+500
7	Esquerda	36+500
8	Direita	38+500
9	Esquerda	40+500
10	Direita	42+500
11	Esquerda	44+500
12	Direita	46+500

Quadro 5.3 – Locais onde se efectuaram as sondagens à rotação⁶⁴

Com os carotes, pretende-se avaliar a profundidade e gravidade das fendas e assim definir os trabalhos de reabilitação do pavimento. A espessura e natureza, assim como a descrição dos locais onde os carotes foram recolhidos, estão apresentadas no anexo A2, contudo, apresenta-se num quadro o resumo das principais características das camadas identificadas a partir das amostras recolhidas.

Carotes	km	Sentido	BB (cm)	MBD (cm)	MB (cm)	RS (cm)	SP (cm)	ABGE (cm)	Total (cm)
1	24+600	Esquerda	3,5	5	6	3,5	-	-	18,5
2	26+500	Direita	5	6	3,5	-	-	-	17,5
3	28+500	Esquerda	4	6,8	5	2	-	-	23
4	30+500	Direita	4	7,5	6,5	-	-	-	18
5	32+500	Esquerda	3	4	5	4	-	-	19
6	34+500	Direita	4	7	8	-	-	-	22
7	36+500	Esquerda	4	4,5	9	-	-	-	18
8	38+500	Direita	3,5	4,5	7	-	-	-	15
9	40+550	Esquerda	4	-	8,5	-	-	-	17,5
10	42+520	Direita	4,5	5,5	7	-	-	-	17
11	44+500	Esquerda	4	6	9	-	-	-	20
12	46+500	Direita	4	-	8	-	-	-	12

Legenda:

BB – Betão betuminoso	RS – Revestimento superficial
MBD – Mistura betuminosa densa	SP – Semi-penetração
MB – Macadame betuminoso	ABGE – <i>Tout-Venant</i>

Quadro 5.4 – Espessura e natureza das camadas identificadas nas carotes recolhidas na E.N. 119⁶⁵⁶⁴ Adaptado de [Barros, 2005]

Analisando o quadro, pode-se concluir que o pavimento, actualmente, ostenta espessuras das camadas betuminosas entre os 12 e 23 cm, excepto nos quilómetros 38+500 e no 46+500.

Os carotes realizadas nessas zonas, especialmente a carote ao km 38+500, justificam o estado deplorável do pavimento. As espessuras são muito reduzidas o que prejudica o funcionamento global do pavimento, pois não apresentam um estrutura de materiais betuminosos suficientemente adequada para resistir às solicitações conjuntas do tráfego e das acções climáticas da zona.

Os restantes quilómetros apresentam uma espessura significativa de camadas betuminosas, contudo, através da observação do pavimento e da análise das carotes, conclui-se que em algumas zonas, as misturas betuminosas apresentam-se degradadas e com uma porosidade excessiva resultante de um envelhecimento do ligante.

- **Sondagens por poço**

O Quadro 5.5 apresenta as zonas onde se realizaram os poços de sondagem.

Poço	Km Inicial	Km Final
1	Direita	29+600
2	Esquerda	45+700

Quadro 5.5 – Locais onde se efectuaram poços de sondagem⁶⁶

Os poços foram realizados junto à berma, com uma secção de aproximadamente 1 m², e com uma profundidade suficiente para atingir o solo de fundação, permitindo assim, além da identificação e aferição da espessura das camadas que constituem o pavimento, a recolha de amostras dos solos de fundação, com vista à realização de ensaios laboratoriais de caracterização de materiais presentes, de compactação e CBR. No anexo A3, encontram-se alguns registos fotográficos realizados aquando da execução dos poços de sondagem.

Na execução do primeiro poço de sondagem ao km 29+600, verificou-se que no terreno envolvente era notória a predominância de saibro. Este dado torna-se importante, no sentido em que pode ajudar na identificação do solo de fundação. Nesse local, em particular, na via onde foi realizada o poço, o pavimento não apresentava fissuras, nem ondulações, excepto no eixo da estrada, onde existia uma fissura longitudinal, devida, em princípio à junta de ligação longitudinal. Nessa zona, a estrada encontrava-se ladeada de taludes de escavação, o que poderia eventualmente contribuir para a degradação do pavimento. Todavia a água que através deles escoava era recolhida por valetas revestidas. Essas valetas, nesse local, não estavam tão colmatadas como as existentes na restante extensão da estrada. Isso deve-se a um trainel com pouca inclinação, mas que permite o escoamento rápido das águas.

⁶⁵ Adaptado de [Barros, 2005]

⁶⁶ Adaptado de [Barros, 2005]

Após a abertura do poço, foi possível observar todas as camadas constituintes do pavimento. O poço foi aberto entre a estrutura inicial do pavimento e a estrutura de alargamentos realizada há 18 anos atrás.

A abertura do segundo poço, ao km 45+700, foi realizada sobre uma zona cuja superfície se apresentava muito degradada. Através de observação visual a camada de desgaste parecia que tinha sido formulada com materiais inadequados, ou que durante o fabrico da mistura betuminosa, essa tinha sido sujeita a altas temperaturas. A zona envolvente do poço apresentava ainda, patologias como fendas e pele de crocodilo.

Durante a realização do poço, a camada de desgaste soltava-se das restantes camadas, provavelmente devido à falta de rega de colagem. A falta dessa ligação pode ter também contribuído para as degradações que o pavimento exhibe nesse local, pois as camadas não trabalhavam em conjunto. Através das sondagens, conseguiram-se obter as espessuras e a natureza das camadas, as quais se encontram no Quadro 5.6.

Poço	Kms	Sentido	Camadas de pavimento		Leito do pavimento
			MB	ABGE	
P1	29+600	Infantado/Coruche	20	37	-
P2	45+700	Coruche/Infantado	20	44	-
Legenda: MB – Misturas betuminosas ABGE – Agregado britado de granulometria extensa					

Quadro 5.6 – Espessura e natureza das camadas identificadas nos poços ⁶⁷

Após a recolha dos materiais dos poços procedeu-se aos ensaios em laboratório.

5.5.9.4 Ensaios em laboratório

Atendendo à caracterização dos materiais constituintes do pavimento e da sua fundação foram realizados os seguintes ensaios laboratoriais:

1. Determinação da baridade e teor em água, do solo de fundação;
2. Granulometrias (solo de fundação);
3. Limites de consistência (LL, LP, IP);
4. Equivalente de areia;
5. Ensaio de compactação (PROCTOR Modificado);
6. Ensaio CBR.

No anexo A3, estão presentes os ensaios e os seus resultados, contudo o Quadro 5.7 apresenta de uma forma resumida os resultados desses ensaios.

⁶⁷ Adaptado de [Barros, 2005]

Características Geotécnicas		Poço	
		P1	P2
LL (%)		NP	NP
IP		NP	NP
EA		27	59
Classificação	Unif.	SW-SM	SW-SM
	Rodov.	A-1-b(0)	A-2-4
W óptimo (%)		9,4	6,1
γ_d máx (g/cm ³)		2,03	2,05
CBR Wópt (95%)		71%	62%

Quadro 5.7 – Principais características dos solos de fundação⁶⁸

Como se pode observar no Quadro 5.7, tanto o solo de fundação retirado do poço 1 como do poço 2 apresentam valores de CBR muito elevados.

Segundo a classificação dos solos, no poço 1 constatou-se que se tratava de um solo com predominância de areia grossa a média e para o poço 2 verificou-se que se tratava de um material granular, com areias bem graduadas. Ambos os solos apresentam características excelentes como solos de fundação.

5.6 Solução Projectada

Tratando-se de um projecto de beneficiação, houve durante a sua elaboração a preocupação constante de conferir à estrada boas características estruturais e superficiais, face à natureza e volume de tráfego esperado para o ano horizonte, tendo sempre como objectivo melhorar o serviço aos utentes, sem perder de vista os factores económicos.

5.6.1 Traçado

O traçado em planta, em perfil longitudinal e em perfil transversal tipo, não sofrerá nenhuma rectificação, exceptuando as ligações. De seguida justifica-se as opções tomadas aquando a execução do projecto de beneficiação da E.N. 119.

- **Planta**

O actual traçado em planta apresenta características que possibilitam aos condutores realizarem uma condução agradável e segura.

Como o maior troço da estrada está assente sobre uma orografia bastante suave, esse factor contribui para a inexistência de zonas sinuosas que requereriam uma alteração profunda para as atenuar.

⁶⁸ Fonte: Recenseamentos E.P. - Estradas de Portugal

A largura da faixa de rodagem actual é aceitável, não existindo a necessidade de contemplar alargamentos no projecto.

Na elaboração do projecto de beneficiação, optou-se por não realizar nenhuma rectificação ao traçado em planta, tendo-se decidido intervir nos diversos entroncamentos e cruzamentos existentes.

- **Perfil longitudinal**

O perfil longitudinal também não irá sofrer grandes alterações, como a beneficiação de curvas côncavas ou convexas, pois não existem casos evidentes, que solicitem esse tipo de intervenção.

A rasante apenas sofrerá uma pequena variação altimétrica, resultante do reforço do pavimento. A acrescentar a esse reforço e devido à observação de empenamentos, o projecto contemplou ainda a execução de uma regularização e reperfilamento longitudinal da faixa de rodagem prévios ao reforço do pavimento.

- **Perfil Transversal tipo**

O perfil transversal tipo actual é composto por uma plataforma com 7,50 metros de largura e esta manter-se-á, como se pode verificar na Figura 5.6.

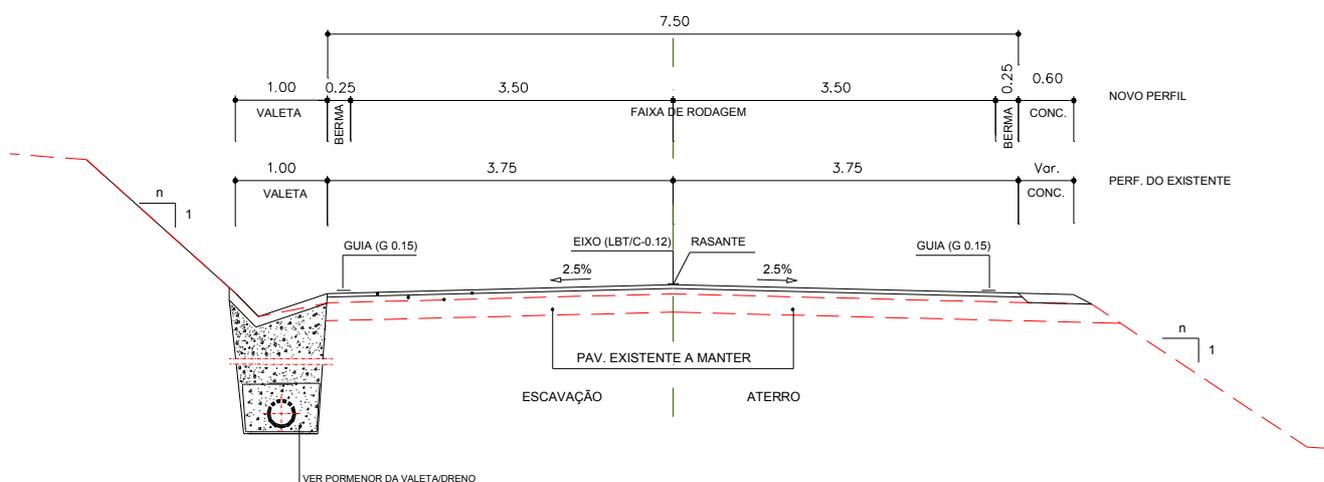


Figura 5.6 – Perfil transversal tipo

Como se pode aferir, na Figura 5.6, a E.N. 119, será constituída por:

1. Faixa de rodagem com duas vias, cuja largura total é de 7,00 metros;
2. Bermas com largura de 0,25 metros.

O projecto da estrada em estudo, refere que em recta a inclinação da faixa de rodagem será de 2,5% para o exterior e nas curvas, dever-se-á considerar as sobrelevações estabelecidas em função do respectivo raio e da velocidade base. O disfarce das sobrelevações será realizado em torno do eixo e totalmente dentro das curvas de transição, quando existem. No caso de não existirem deverão ser disfarçadas de acordo com as recomendações das Normas da extinta J.A.E..

Ainda deverão ser consideradas as sobrelarguras também em função do respectivo raio e da respectiva velocidade base.

Em plena estrada, a concordância com o terreno natural será feita mediante arredondamento com curvas tangenciais de valor igual ou superior a 0,60 metros.

Na caracterização da situação existente, verificou-se que a inclinação transversal está muito desajustada quando comparada com o valor de 2,5%. Em muitas situações a inclinação chega a atingir valores nulos.

Existem casos pontuais em que a degradação do pavimento evoluiu e manifestou-se através de abatimentos e irregularidades que desconfiguram por completo a imagem do perfil transversal tipo. Essa correcção foi considerada no projecto, prevendo-se a execução de uma pré-regularização, cuja medição de material a colocar será realizada à tonelada.

Como o perfil transversal tipo não terá nenhuma alteração quanto à largura, os taludes também não sofrerão qualquer alteração, estando apenas prevista a sua regularização.

O perfil ficará alterado considerando as cotas da rasante, que serão aumentadas devido ao reforço do pavimento.

- **Ligações, intersecções e serventias**

Na elaboração do projecto de execução da E.N. 119, algumas das ligações, foram objecto de tratamento cuidado, de acordo com as ordens de prioridade fixadas e de acordo com as configurações que assegurem movimentos de viragem individualizados e sempre que possível fisicamente separados, mediante a implantação de sinalização horizontal, de separadores e ilhéus em lancil galgável.

As ligações, além de serem melhoradas a nível de geometria, foram também matéria de estudo, a nível de reforço do pavimento, de sistema de drenagem, de equipamento de sinalização e segurança e das obras acessórias.

Algumas das intersecções localizam-se nas travessias das localidades e conseqüentemente apresentam características urbanas, não sendo possível a adopção das medidas preconizadas pelas Normas da J.A.E..

Para se conseguir valores mínimos de segurança na reformulação das ligações, foi necessário recorrer ao alargamento das vias existentes ocupando terrenos confinantes.

Merece uma referência especial a intersecção localizada no Monte da Barca (km 48+125). Após análise dos problemas existentes nesta ligação, descritos anteriormente nesta dissertação, no ponto 5.5.4, a decisão foi implantar uma rotunda.

Essa decisão, tem como fundamento uma experiência realizada nessa mesma estrada, numa ligação (Infantado) com características muito semelhantes à ligação do Monte da Barca, em que se obteve um enorme sucesso, sendo eliminado um ponto negro no Distrito de Santarém.

De apoio a essa decisão, também estiveram em questão os custos elevados da sinalização semafórica presentes nessa ligação.

- **Serventias públicas e privadas**

Como na caracterização do existente, se confirmou que existe a necessidade de manter os acessos existentes, no projecto da E.N. 119, estipulou-se que terão de ser dotados das seguintes características fundamentais:

1. Condições geométricas que permitam uma inserção tão fácil quanto possível na estrada, nomeadamente no que se refere à visibilidade do automóvel;
2. Condições de drenagem eficazes, no que respeita à zona da sua implantação na estrada;
3. Condições de pavimentação ajustadas à natureza do trânsito interessado.

- **Paragens de autocarro e gares de paragem**

Como maior parte das paragens de autocarro estão bem implantadas, apenas se previu o reforço do pavimento nesses locais.

Quanto às gares de paragem, foram analisados os locais que permitem a paragem dos veículos em segurança. Nesses locais serão executadas bases que permitam receber o material betuminoso, de forma a dotá-las com capacidade de carga suficiente para suportarem o peso dos veículos que aí irão parar, principalmente o peso dos veículos pesados.

5.6.2 Terraplenagens

Os trabalhos previstos no projecto, referentes às terraplenagens baseiam-se no seguinte:

1. Trabalhos preparatórios, que incluem a desmatação, decapagem e preparação da fundação de aterros;
2. Escavação e transporte dos materiais provenientes de empréstimo para zonas de aterro (rotunda do Monte da Barca);
3. Desmatação e regularização dos taludes de aterro e escavação;
4. Execução de aterros;
5. Trabalhos complementares (máscaras drenantes, escavação para implantação de muros de suporte).
6. Arranque, poda e corte de árvores

O arranque e a poda de árvores existentes ao longo da E.N. 119, tem como propósito melhorar a segurança e circulação dos utentes e dos seus bens.

Em certos locais, previu-se o corte de raízes nas zonas marginais, pois essas provocam grandes deformações no pavimento. Para banir ou retardar futuras fendas e deformações, foi prevista a colocação de painéis de betão, na zona confinante da estrada, com vista a criar uma barreira ao desenvolvimento e crescimento de raízes para a zona da estrada.

5.6.3 Drenagem

Um dos aspectos a considerar, tendo em conta os custos de conservação é a drenagem.

Com base na observação visual realizada ao sistema de drenagem existente na E.N. 119, concluiu-se que tanto a drenagem longitudinal como a transversal se encontrava em condições algo precárias, sendo em parte a responsável pelo elevado grau de degradação dos pavimentos, o projecto adoptou um número de medidas que se irão descrever de seguida.

- **Drenagem Transversal**

A estrada atravessa inúmeras linhas de água, cuja continuidade é assegurada por passagens hidráulicas, por pontões e pontes.

Em virtude de se tratar de uma reabilitação dentro dos actuais limites da plataforma, não foram contemplados prolongamentos de passagens hidráulicas.

Tendo-se efectuado uma inspecção às actuais condições de funcionamento da maioria das passagens hidráulicas e pontões, determinou-se que algumas seriam aproveitadas devendo ser beneficiadas com operações de limpeza e eventuais reparações.

As passagens hidráulicas a construir ou a reparar, com capacidade suficiente para escoar os caudais calculados, terão uma secção circular de diâmetro idêntico ou com superior capacidade de vazão, em manilhas de betão com o diâmetro mínimo de 0,80 metros.

Tendo em conta os custos e a dificuldade dos trabalhos de conservação corrente, todas as medidas adoptadas que facilitem a realização desses trabalhos são bem acolhidas. A colocação de passagens hidráulicas com o diâmetro mínimo de 0,80 metros vai de encontro a essa intenção.

Haverá ainda que proceder à regularização das linhas de água, junto às bocas de aterro e de escavação, de forma a garantir que a drenagem transversal se realize eficazmente.

- **Drenagem Longitudinal**

Tendo em conta que a drenagem longitudinal existente, está actualmente a funcionar ineficazmente, esta terá que sofrer uma profunda intervenção com a intenção de a colocar a operar de uma forma eficiente.

O sistema de drenagem longitudinal é constituído por dispositivos subterrâneos e superficiais, nos quais a intervenção vai assentar.

1. Drenagem subterrânea

Drenos – Como já foi referido, um sistema de drenagem deficiente, afecta directamente o comportamento estrutural e até mesmo o comportamento superficial de uma estrada.

Para evitar situações de infiltrações de água nas camadas granulares e no solo de fundação, devido a águas vindas dos terrenos adjacentes à estrada, estão previstos drenos. Existe uma grande variedade de drenos, mas todos têm a finalidade de interceptar as

águas antes de chegarem à estrutura do pavimento e escoá-las até linhas de água ou até linhas de talvegue.

Nas zonas onde se averiguou a existência de elevados níveis aquíferos, conforme se pôde intuir aquando do reconhecimento de superfície, o projecto previu a construção de drenos de rebaixamento do nível freático. Nas passagens pelos aglomerados e para evitar qualquer interferência dos drenos longitudinais com infra-estruturas subterrâneas eventualmente existentes admitiu-se a construção de drenos de constituição idêntica, mas com profundidade reduzida.

Tendo em conta a futura conservação, para facilitar a limpeza e inspecção dos drenos, foram previstas a execução de caixas de visita e de limpeza.

2. Drenagem superficial

Valetas de plataforma – Nas zonas de escavação, para recolher as águas vindas dos taludes, serão reconstruídas e construídas valetas com saídas regularizadas para linhas de talvegue ou de água.

A sua execução será ainda realizada nos lanços constituídos por pequenos traineis de reduzida inclinação e naqueles onde a erodibilidade dos solos poderá atingir maiores proporções, atendendo à natureza geológica dos terrenos.

De referir, que actualmente, existem valetas de plataforma e algumas encontram-se associadas a drenos. Como esse sistema se encontra totalmente obstruído e o inevitável reforço do pavimento aumenta a cota da actual rasante, justifica-se a demolição das valetas existentes e posterior construção de novas.

Valetas de bordadura – De forma a minimizar a acção erosiva das águas de escorrência vindas da plataforma da estrada, o projecto propôs a construção de valetas de bordadura, em meias manilhas, em todos os intradorsos de curvas em aterro e em alinhamentos rectos sempre que a altura dos aterros seja superior a 2,0 metros.

Manilhas em serventias – As serventias situadas em zonas de escavação, são consideradas como uma obstrução ao escoamento das águas das valetas. Para resolver essa situação estão previstas manilhas sob as serventias.

Valas base de talude – Durante a realização da caracterização da situação existente detectaram-se valas na base dos taludes com muita vegetação, completamente assoreadas e com inexistentes saídas de água, o que facultou a estagnação da água nesse local. O pavimento nesses locais apresenta grandes assentamentos, resultantes da infiltração de água na estrutura do aterro.

Nas zonas de aterro, onde o terreno natural tende para o lado da estrada, e a fim de acautelar a acumulação de águas de escorrências na base dos taludes em quantidades que seriam inconvenientes para a sua estabilidade, foram previstas valas pé de talude, de secção triangular afastadas no mínimo 1 metro da base do talude de aterro.

Estas linhas devem ser construídas na extensão necessária, conduzindo-as para passagens hidráulicas ou linhas de água.

Valas de crista de taludes – Nos locais onde se verificou a necessidade de captar águas de escorrências das encostas sobranceiras aos taludes de escavação, foram previstas valas de crista, de forma a preservar-se a sua estabilidade e a não sobrecarregar o sistema de drenagem da plataforma.

Descida em água em taludes – As águas recolhidas por valetas de bordadura e por valas de crista têm que ser escoadas através de canais.

Nos casos de descidas de águas em taludes, quando não estão associadas a caixas de recepção, deverão ser adoptados dissipadores de energia, em betão, tendo em vista controlar a velocidade das águas, reduzindo-se ao mínimo o seu poder destruidor.

Caixas de Visita – As caixas de visita dos drenos e dos colectores existem para facultarem a limpeza, para assegurar mudanças de direcção ou inclinação e para inspecção e identificação de avarias. Nos drenos, as caixas de visita foram consideradas, nos colectores de águas pluviais.

Colectores e Sumidouros – Existem apenas duas ligações onde foram previstos colectores de águas pluviais, que asseguram um escoamento subterrâneo das águas superficiais na ausência de valetas.

Integrados no sistema de colectores pluviais considerados e para recolha das águas superficiais do pavimento, foram previstos sumidouros.

5.6.4 Obras Acessórias

As obras acessórias consideradas no projecto da E.N. 119, baseiam-se na integração paisagística, na construção de vedações e muros de contenção de terras, na materialização física de ilhéus e separadores e na colocação de iluminação pública.

O estudo de integração paisagística baseou-se apenas na colocação de terra vegetal na ilha central da rotunda ao km 48+125 e revestimento de taludes com vegetação que não permita a sua erosão.

Durante a campanha de caracterização, verificou-se que um talude apresentava indícios de uma certa instabilidade, no sentido de promover a contenção de eventuais escorregamento de deslizamentos de solos, estão previstos a execução de muros de gabiões.

A colocação de ilhéus e separadores contribui para elevar a percentagem de segurança nos movimentos de viragem. A existência desses pequenos obstáculos nas ligações obrigam os condutores a realizar trajectórias pré-definidas, diminuindo os conflitos. Os separadores e ilhéus separadores de trânsito, serão materializados em lancil galgável, e todos serão revestidos com betonilha.

Quanto à instalação da rede de iluminação pública, esta apenas será realizada na zona da rotunda, de modo a atribuir-lhe uma maior visibilidade nocturna, contribuindo assim para uma maior segurança dos condutores.

Ao longo do traçado da E.N. 119, existem diversos serviços, que em princípio não serão afectados, dado que a estrada não vai sofrer alargamentos do pavimento. Porém, quando se proceder aos

trabalhos de beneficiação nos entroncamentos e cruzamentos existem serviços e infra-estruturas que poderão ser afectadas, nomeadamente serviços relativos a iluminação e comunicações públicas.

5.6.5 Equipamento de Segurança

A inventariação feita na E.N. 119 permitiu registar toda a sinalização horizontal, vertical e equipamento de segurança. Mediante estudos realizados posteriormente a todo o sistema de sinalização e segurança, constatou-se que existiam algumas situações que teriam que ser revistas.

Ao longo do seu desenvolvimento, a estrada apresenta duas configurações distintas na sua sinalização, ou seja, uma sinalização típica de estrada e uma outra mais urbana nas travessias das três localidades (Foros de Almada, Biscainho e Courelas da Amoreirinha).

O projecto de sinalização foi elaborado de acordo com as normas em vigor e em conformidade com o decreto-Lei n.º 22-A/98 de 1 de Outubro.

De seguida apresentam-se os pormenores mais representativos dos dispositivos a aplicar ou materializar:

1. Sinalização horizontal (marcas rodoviárias);
2. Sinalização vertical (denominada de código);
3. Sinalização vertical do sistema informativo;
4. Guardas de segurança e dispositivos de protecção de motociclistas;
5. Guiamento e balizagem;
6. Demarcação.

Durante a caracterização do equipamento de sinalização e segurança, observou-se que existiam guardas de segurança colocadas, contudo existem muitos locais que necessitam da sua colocação imediata, como nos taludes superiores a 3 metros e nas zonas das passagens hidráulicas.

Os dispositivos de segurança para motociclistas também foram considerados no projecto, uma vez que eram inexistentes no local.

De salientar, que neste projecto, o guiamento e a balizagem mereceram destaque, pois contribuem muito para uma condução segura. As ligações, foram dotadas de marcadores (olhos de gato) direccionais e unidireccionais, isto devido ao facto de a estrada apresentar um traçado muito rectilíneo, em que se torna importante realçar os entroncamentos e cruzamentos durante a noite de modo a evitar acidentes.

A colocação de delineadores em toda a extensão da estrada também ajuda a condução nocturna, tornando possível observar a delimitação da estrada.

5.6.6 Pavimentação

No capítulo 3, estão descritas várias técnicas de reabilitação de pavimentos. As técnicas de reabilitação superficiais, que actuam a nível da camada de desgaste e que só se devem aplicar quando se está perante pavimentos que não apresentam problemas estruturais, não se adequam aos problemas existentes na E.N. 119, pois esta apresenta zonas com problemas estruturais, nomeadamente na zona

dos aterros. Assim, a E.N. 119 terá que ser reabilitada estruturalmente, ou seja, terá que ser reforçada com a aplicação de novas camadas de misturas betuminosas. O aumento do tráfego esperado, devido à abertura da A13, também é um factor a considerar, uma vez que a estrada tem que responder eficazmente às futuras solicitações.

No ponto 5.5.9 (Caracterização do Pavimento Existente) desta dissertação estão descritas as várias patologias patentes na E.N. 119, contudo, observam-se ainda deformações no pavimento devido ao efeito de raízes das árvores que se encontram na zona adjacente ao limite do pavimento.

No projecto da E.N. 119 existiu o cuidado de projectar duas soluções para beneficiar o pavimento:

1. Reforço do pavimento recorrendo a misturas betuminosas convencionais;
2. Reforço do pavimento recorrendo a misturas betuminosas com BMB com elevada percentagem de granulado de borracha.

Considerou-se como alternativa a uma reabilitação com misturas betuminosas convencionais, a aplicação de misturas betuminosas com BMB, devido ao que já foi exposto no capítulo 4, desta dissertação. Destacando-se o facto das misturas com BMB apresentam uma elevada resistência à fadiga e à reflexão de fendas, o que se traduz numa maior durabilidade do pavimento.

O dimensionamento do pavimento foi realizado por Barros⁶⁹, e teve como base os resultados dos ensaios de carga e das sondagens que foram realizados.

- **Solução 1 – Reforço do pavimento com misturas betuminosas convencionais [Barros, 2005]**

1. Trabalhos Preparatórios

Como já foi referido o pavimento actual apresenta um fendilhamento acentuado, tanto no que se refere à área afectada por este fenómeno, como à abertura de fendas.

A colocação de misturas betuminosas directamente sobre o pavimento existente, nestas condições teria como consequência, a curto prazo, o aparecimento de fendas à superfície da nova camada por reflexão de fendas que existem na camada inferior.

Nestes casos, a nova camada betuminosa não potencia a sua capacidade resistente, uma vez que não utiliza a sua capacidade de resistência à fadiga, porque fatura devido à reflexão de fendas existentes no pavimento antes da beneficiação. Por essa razão, é necessário introduzir um elemento que retarde este processo de propagação de fendas, de modo a que a camada de reforço possa atingir o limite da sua vida útil por fendilhamento por fadiga, e não precocemente por reflexão de fendas do pavimento antigo.

Para prevenir a reflexão de fendas adoptou-se o procedimento habitual de fresagem e enchimento da espessura fresada com misturas betuminosas.

Como o fendilhamento é muito acentuado, reforçam-se as zonas a fresar com geotêxtil impregnado com betume, metodologia tradicionalmente empregue nestas situações, que irá funcionar como elemento retardador de fendas.

⁶⁹ [Barros, 2005]

Assim, previamente à execução de trabalhos de reforço, preconiza-se a execução dos seguintes trabalhos preparatórios:

- Fresagem com 5 cm de espessura;
- Colocação de geotêxtil impregnado com betume;
- Reposição da espessura fresada (5 cm) com mistura betuminosa densa.

Para além deste trabalho preparatório consideraram-se ainda as seguintes intervenções:

- Reperfilamento com mistura betuminosa densa, nos locais em que o pavimento apresenta assentamentos nos bordos dos aterros;
- Remoção e posterior reconstrução do pavimento após corte de raízes nos locais em que estas estão a dar origem a deformações no pavimento.

Os reperfilamentos serão executados nos locais já referidos, em que se verificam deformações devido a assentamentos de aterros.

A reconstrução do pavimento nas zonas das raízes será executado de acordo com a seguinte estrutura:

- Leito do pavimento: escarificação e compactação dos solos existentes;
- Camada de sub-base: agregado britado de granulometria extensa, com 0,20 m de espessura;
- Camada de base: agregado britado de granulometria extensa, com 0,20 m de espessura;
- Mistura betuminosa: macadame betuminoso com 0,14 m de espessura, após colocação de uma rega de impregnação, de modo a ficar à cota do pavimento actual;

A remoção e reconstrução do pavimento serão executadas sempre com uma largura mínima de 2 m, e com um comprimento mínimo de 5 m, de modo a poderem ser utilizados equipamentos de espalhamento e compactação adequados.

2. Reforço do pavimento existente

Após a realização dos trabalhos preliminares, o reforço do pavimento existente será executado tendo em consideração os resultados obtidos nos ensaios de carga com o Deflectómetro de Impacto (FWD) e a informação recolhida nos poços e carotes que foram realizados no âmbito deste projecto.

De acordo com esses resultados, e com o dimensionamento estrutural, preconiza-se a colocação de uma camada de desgaste em betão betuminoso com 5 cm de espessura mínima, após aplicação da rega de colagem, em toda a extensão do traçado, excepto entre o kms 46+000 e 47+000.

Entre o km 46+000 e o km 47+000, onde o pavimento se encontra mais deteriorado, preconiza-se a fresagem da actual camada de desgaste com 5 cm de espessura, a

colocação de um geotêxtil impregnado, e a execução de duas camadas betuminosas (mistura betuminosa densa com 5 cm e betão betuminoso de desgaste com 5cm). Entre estas duas camadas betuminosas será executada uma rega de colagem em emulsão betuminosa.

- **Solução 2 – Reforço do pavimento com misturas betuminosas com betume modificado com borracha de elevada viscosidade [Barros, 2005]**

1. Trabalhos Preparatórios

Como o pavimento apresenta um fendilhamento generalizado preconizou-se uma solução alternativa com a aplicação de misturas betuminosas modificadas com elevada percentagem de borracha reciclada de pneus usados que apresentam uma elevada resistência à reflexão de fendas e uma elevada vida à fadiga. Com a utilização desta mistura betuminosa é possível reduzir a área a fresar para cerca de 25%, e dispensar a utilização do geotêxtil impregnado com betume. Neste caso, preconiza-se a fresagem nos locais em que as fendas tenham abertura superior a 3 mm, e nos locais em que se verifica desagregação superficial da camada de desgaste existente devido a eventuais deficiências da sua colocação em obra e/ou a um envelhecimento precoce do ligante.

Os trabalhos de reperfilamento e reconstrução nas zonas deformadas por acção das raízes serão os mesmos adoptados na solução 1.

2. Reforço do pavimento existente

Após a realização dos trabalhos preliminares, o reforço do pavimento existente será executado tendo em consideração os resultados obtidos nos ensaios de carga com o Deflectómetro de Impacto (FWD) e a informação recolhida nos poços e carotes que foram realizados no âmbito deste projecto.

De acordo com estes resultados, e com o dimensionamento estrutural, preconiza-se a colocação de uma camada de desgaste em mistura betuminosa modificada com borracha (BMB) com 4 cm de espessura mínima, em toda a extensão do traçado, excepto entre o kms 46+000 e 47+000. Nesta solução, foi também prevista a execução de reperfilamentos com betão betuminoso 0/10 mm na espessura média de 3 cm a colocar nas zonas mais irregulares, antes da aplicação da camada de desgaste. Para este trabalho prévio estimaram-se 600 ton de mistura betuminosa densa. Entre o km 46+000 e o km 47+000, onde o pavimento se encontra mais deteriorado, preconiza-se a fresagem da actual camada de desgaste com 5 cm de espessura, e a execução de duas camadas betuminosas (mistura betuminosa densa com 5 cm e mistura betuminosa com borracha com 4 cm).

5.6.7 Cálculo da Estrutura de Reforço

No que se refere à justificação das soluções de reforço adoptadas, interpretaram-se os resultados de ensaio de carga e das sondagens que foram realizadas. Foi com base nesses resultados, e na atribuição de valores para as características mecânicas das várias camadas, que se elaborou o modelo do

comportamento estrutural do pavimento, o qual permite efectuar os cálculos de verificação da capacidade de carga.

A metodologia adoptada no dimensionamento do reforço e do pavimento a construir nos alargamentos, recorre ao cálculo dos estados de tensão e deformação induzidos no pavimento por um dado número de aplicações de um eixo padrão de 130 kN. Trata-se de uma metodologia que tem por base a chamada “análise estrutural” do pavimento e respectiva fundação e que, desde há alguns anos, tem vindo a ser utilizada.

Para uma correcta utilização deste tipo de métodos no dimensionamento de um pavimento novo ou na avaliação da capacidade de carga de um antigo torna-se necessário [Barros, 2005]:

- a) Definir as acções a que o pavimento estará sujeito, nomeadamente, a geometria dos diversos rodados dos previsíveis veículos pesados que virão a circular naquele, e respectivo número de aplicações de carga, carga por roda e pressão de enchimento;
- b) Analisar as características mecânicas dos materiais que constituem as diversas camadas;
- c) Proceder ao cálculo dos estados de tensão e de deformação induzidos no pavimento pelos rodados;
- d) Definir os estados limites de ruína do pavimento tendo em atenção os objectivos a que este se destina a atingir e a natureza dos materiais das camadas que o constituem.

Com vista a obter os elementos necessários à concretização da metodologia de estudo exposta anteriormente, realizaram-se, como já anteriormente foi referido nesta dissertação, os ensaios com o deflectómetro de impacto, sondagens por poços e à rotação, e ensaios laboratoriais.

- **Tráfego de projecto [Barros, 2005]**

Com base no estudo de tráfego elaborado para o lanço em estudo, que se baseou nos valores obtidos no ponto 5.5.8 desta dissertação, e no que se refere à definição do tráfego de veículos pesados que se prevê virem a circular neste lanço durante o período de vida útil do projecto (2005 / 2015 / 2025), consideraram-se os seguintes valores de TMDA:

Ano	2005	2010	2015
TMDA _{Pe}	481	564	647

Quadro 5.8 – Previsão do TMDA_p⁷⁰

No cálculo do número acumulado de eixos padrão de 130 kN utilizou-se ainda um factor de agressividade igual a 0,6, valor recomendado no “Manual de Concepção de Pavimentos para a rede Rodoviária Nacional” da J.A.E., para tráfegos deste tipo.

Deste modo, o número acumulado de eixos padrão de 130 kN, ao longo do período de vida útil do projecto de 10 anos, será igual a:

$$NAEP_{130kN} = 6,18 \times 10^5$$

⁷⁰ Adaptado de [Barros, 2005]

- **Propriedades mecânicas dos materiais utilizados nas camadas de reforço [Barros, 2005]**

Para as misturas betuminosas a aplicar nas camadas de reforço e de pavimento novo (reconstruções), adoptaram-se os seguintes valores para as suas propriedades mecânicas:

Misturas betuminosas fabricadas com betume 35/50 → E=5.000 MPa

Misturas betuminosas fabricadas com BMB – MBR → E= 4.000 MPa

De seguida apresentam-se as principais características da mistura betuminosa rugosa com BMB projectada para aplicar neste projecto.

5.6.8 Critérios de dimensionamento

- **Fadiga das camadas betuminosas [Barros, 2005]**

Dado que, sob a acção dos rodados dos veículos, as camadas betuminosas, que se admitem ligadas, têm um funcionamento idêntico ao de uma laje em flexão, os esforços de tracção mais elevados ocorrem na zona inferior das referidas camadas. O critério de fadiga das camadas betuminosas corresponde deste modo, a fixar um valor limite para a extensão máxima de tracção na base destas camadas, ϵ_t , que, de acordo com a Shell, e para as características do materiais a aplicar, conduz, no caso das misturas betuminosas, a:

$$\epsilon_t = [0,856 \times V_b + 1,08] \times E^{-0,36} \times N^{-0,20}, \text{ com } N = N_{AEP130kN}$$

em que $V_b = 11\%$ nas misturas betuminosas tradicionais e $V_b = 17,3\%$ nas misturas betuminosas fabricadas com betume modificado com borracha reciclada de pneus usados.

- **Deformação permanente da fundação [Barros, 2005]**

De forma a limitar a contribuição do solo de fundação na formação de cavados de rodeira, adoptou-se o critério proposto pela Shell que limita a extensão máxima de compressão no topo do solo de fundação a:

$$\epsilon_c = \beta \times 10^{-2} \times N^{-0,25}, \text{ com } N = N_{AEP130kN}$$

Tratando-se de uma plataforma estabilizada, e tendo em atenção os bons resultados obtidos das condições “*in situ*” dos solos de fundação, adoptou-se uma probabilidade de ruína de 15%.

- **Modelo de comportamento estrutural – geometria de cálculo [Barros, 2005]**

De modo a avaliar a capacidade de carga do pavimento existente e, conseqüentemente, proceder ao cálculo do reforço, torna-se indispensável dispor de um modelo de cálculo que represente o comportamento estrutural do pavimento quando este é sujeito à acção dos rodados dos veículos pesados. Tal modelo pressupõe o conhecimento da constituição do pavimento e dos módulos de deformabilidade das diversas camadas, bem como, da fundação.

Os módulos de deformabilidade das camadas foram estimados com base na interpretação, através do programa de cálculo automático ELSYM, dos resultados dos ensaios de carga

realizados, definindo-se por sua vez a constituição do pavimento a partir dos resultados da prospecção. Fixaram-se, ainda, valores para os coeficientes de Poisson de acordo com a natureza dos materiais das camadas. De um modo geral, procurou-se, fundamentalmente, por um processo iterativo, determinar o conjunto de módulos de deformabilidade para o qual as deflexões calculadas pelo ELSYM para a estrutura indicada em cada segmento homogéneo, quando solicitada por uma força idêntica à utilizada no ensaio de carga correspondente ao local da respectiva sondagem em causa, se aproximavam o mais possível dos valores das deflexões medidas.

Apresenta-se de seguida um resumo dos resultados obtidos:

1. Trechos com deflexão característica igual a 380 microns

Estrutura do pavimento		
Material	Espessura (cm)	Módulos de deformabilidade obtidos
Misturas betuminosas	18	5.500
Semi-penetração	10	950
Solo de fundação	-	40

Quadro 5.9 – Estrutura do pavimento⁷¹

Deflexões (micron)							
	Df ₀	Df ₁	Df ₂	Df ₃	Df ₄	Df ₅	Df ₆
Medidas	378	305	261	225	162	116	84
Calculadas	362	349	290	249	175	116	70

Quadro 5.10 – Deflexões⁷²

2. Trechos com deflexão característica igual a 593 microns

Estrutura do pavimento		
Material	Espessura (cm)	Módulos de deformabilidade obtidos
Misturas betuminosas	18	2.500
Semi-penetração	10	550
Material granular	20	200
Solo de fundação	-	30

Quadro 5.11 – Estrutura do pavimento⁷³

⁷¹ Adaptado de [Barros, 2005]

⁷² Adaptado de [Barros, 2005]

Deflexões (micron)							
	Df ₀	Df ₁	Df ₂	Df ₃	Df ₄	Df ₅	Df ₆
Medidas	642	592	297	267	200	142	108
Calculadas	623	550	447	374	250	156	89

Quadro 5.12 – Deflexões⁷⁴

3. Trechos com deflexão característica igual a 912 microns (entre o km 46+000 e o km 47+000)

Estrutura do pavimento		
Material	Espessura (cm)	Módulos de deformabilidade obtidos
Betão betuminoso	5	1.500
Betão betuminoso	7	2.000
Material granular	30	170
Solo de fundação	-	65

Quadro 5.13 – Estrutura do pavimento⁷⁵

Deflexões (micron)							
	Df ₀	Df ₁	Df ₂	Df ₃	Df ₄	Df ₅	Df ₆
Medidas	912	606	353	263	127	77	56
Calculadas	902	538	378	272	144	76	38

Quadro 5.14 – Deflexões⁷⁶

- **Verificação estrutural dos pavimentos propostos [Barros, 2005]**

Tendo por base a metodologia de cálculo baseada no método racional que se apresentou anteriormente, efectuou-se a análise estrutural da solução de reforço preconizada.

Deste modo, considerando o modelo de cálculo definido para efeitos da caracterização do pavimento existente, e admitindo para as camadas betuminosas constituintes da solução de reforço as propriedades mecânicas adoptadas anteriormente, determinaram-se, recorrendo ao programa de cálculo automático BISAR, os valores que ocorrem quando as estruturas de pavimento analisadas são solicitadas pela acção de um eixo padrão de 130 kN,

⁷³ Adaptado de [Barros, 2005]

⁷⁴ Adaptado de [Barros, 2005]

⁷⁵ Adaptado de [Barros, 2005]

⁷⁶ Adaptado de [Barros, 2005]

designadamente as extensões máximas de tracção na base das camadas betuminosas ($\varepsilon_t^{\text{máx}}$) e as extensões máximas de compressão no topo da fundação ($\varepsilon_c^{\text{máx}}$).

A partir dos valores das extensões máximas obtidos, e com base nos critérios de dimensionamento atrás enunciados, determinaram-se igualmente, para efeitos de verificação da capacidade de carga, os números acumulados de eixos padrão admissíveis, ou seja, que as estruturas permitem suportar antes de ocorrer a rotura por fadiga das camadas betuminosas ou por deformação permanente da fundação.

No quadro seguinte apresentam-se os resultados obtidos:

Estrutura do pavimento	Rotura por fadiga em tracção das camadas betuminosas		Deformações permanentes da fundação	
	ε_t ($\times 10^{-6}$)	$N_{AEP\ adm}^{\text{bet}}$	ε_t ($\times 10^{-6}$)	$N_{AEP\ adm}^{\text{fund}}$
Solução 1 – Betão betuminoso = 5 cm	206,5	$2,58 \times 10^7$	554,0	$1,11 \times 10^7$
Solução 1 – km 46+000 ao km 47+000 (5 BBd + 5 MBD)	275,6	$9,49 \times 10^5$	553,5	$1,12 \times 10^7$
Solução 2 – MBR (betume modificado com borracha) = 4 cm	225,5	$1,66 \times 10^7$	605,3	$7,82 \times 10^7$
Solução 2 – km 46+000 ao km 47+000 (4 MBR-BMB + 5 MBD)	281,4	$8,55 \times 10^5$	569,8	$8,55 \times 10^5$

Quadro 5.15 – Resultados do cálculo da capacidade de carga dos modelos estruturais adoptados⁷⁷

Analisando os resultados obtidos, verifica-se que os valores determinados pelos critérios de ruína, a partir das extensões máximas admissíveis induzidas pela passagem dos eixos padrão de 130 kN, são superiores aos volumes acumulados de tráfego esperados para o período de dimensionamento de 10 anos (5.6.7 – Tráfego de Projecto), concluindo-se que ambas as soluções de reforço preconizadas apresentam características mecânicas compatíveis com as condições de utilização expectáveis durante a vida de projecto, satisfazendo os critérios de dimensionamento adoptados.

5.7 Solução Adoptada no Projecto

5.7.1 Análise da Estrutura do Pavimento

Para o projecto da E.N. 119, como já foi referido anteriormente, foram apresentadas duas soluções para reforçar o pavimento existente.

⁷⁷ Adaptado de [Barros, 2005]

Uma das soluções seria o reforço com base nas misturas betuminosas tradicionais e outra tratava-se de uma solução com base em misturas fabricadas com betume modificado com borracha reciclada de pneus com elevada percentagem de borracha. Contudo, a Direcção de Estradas de Santarém, após apreciação das soluções propostas, realizou um outro estudo que deu origem a mais duas soluções (solução 3 e 4).

Após dimensionamento do pavimento, obtiveram-se as diferentes estruturas para cada caso. Descrevem-se de seguida, de um modo sucinto essas estruturas e os trabalhos a realizar nas duas soluções apresentadas por RECIPAV, com base no estudo do pavimento realizado por Barros⁷⁸:

a) Solução 1 - Reforço do pavimento com misturas betuminosas convencionais

- Secção Corrente

Camada de desgaste em betão betuminoso	5 cm
Rega de colagem	-
Reperfilamento do pavimento existente com mistura betuminosa densa nas zonas com bordos deformados, incluindo rega de colagem	Var.
Reposição com mistura betuminosa densa	5 cm
Colocação de geotêxtil impregnado	-
Fresagem do pavimento	5 cm

Quadro 5.16 – Solução 1- secção corrente⁷⁹

- Secção entre o km 46+000 e o km 47+000

Camada de desgaste em betão betuminoso	5 cm
Rega de colagem	-
Reposição com mistura betuminosa densa	5 cm
Colocação de geotêxtil impregnado	-
Fresagem do pavimento	5 cm

Quadro 5.17 – Solução 1- secção entre o km 46+000 e km 47+000⁸⁰

⁷⁸ [Barros, 2005]

⁷⁹ Adaptado de [Barros, 2005]

⁸⁰ Adaptado de [Barros, 2005]

b) Solução 2 - Reforço do pavimento com misturas betuminosas com betume modificado com borracha

• Secção Corrente

Camada de desgaste em MBR-BMB	4 cm
Rega de colagem com emulsão modificada	-
Reperfilamento do pavimento existente com betão betuminoso 0/10 na espessura média de 3 cm incluindo rega de colagem	3 cm (média)
Reperfilamento do pavimento existente com mistura betuminosa densa nas zonas com bordos deformados, incluindo rega de colagem	-
Reposição com mistura betuminosa densa	5 cm
Rega de colagem	-
Fresagem do pavimento	5 cm

Quadro 5.18 – Solução 2 - secção corrente⁸¹

• Secção entre o km 46+000 e o km 47+000

Camada de desgaste em MBR-BMB	4 cm
Rega de colagem com emulsão modificada	-
Reposição com mistura betuminosa densa	5 cm
Rega de colagem	-
Fresagem do pavimento	5 cm

Quadro 5.19 – Solução 2- secção entre o km 46+000 e km 47+000⁸²

c) Solução comum a ambas as soluções (tratamento de raízes e alargamentos)

Camada em macadame betuminoso	14 cm
Rega de impregnação	-
Camada de base em agregado britado de granulometria extensa	20 cm
Camada de sub-base em agregado britado de granulometria extensa	20 cm
Saneamento do pavimento, para tratamento das zonas de influência das raízes	Var.

Quadro 5.20 – Solução 1e 2 - tratamento de raízes e alargamentos⁸³

Com dimensionamento do reforço do pavimento, realizado com base nos resultados obtidos com os ensaios de carga, sondagens por poços e à rotação, obtiveram-se as estruturas acima indicadas, contudo além das estruturas preconizadas para cada solução, ainda se previu a realização de trabalhos preparatórios.

⁸¹ Adaptado de [Barros, 2005]

⁸² Adaptado de [Barros, 2005]

⁸³ Adaptado de [Barros, 2005]

Após apreciação de ambas as soluções, poder-se-á concluir que o reforço do pavimento é constituído por camadas reduzidas, porém esse facto justifica-se devido à E.N. 119 estar assente sobre solos de fundação com muito boas características, como se pode verificar no Anexo 4.

Não colocando em causa as estruturas resultantes do dimensionamento, existe uma peculiaridade que a E.N. 119 apresenta e não foi considerada no dimensionamento. Essa peculiaridade está associada à falta de pente transversal (Figura 5.7) na maior parte da extensão da E.N. 119. Essa pente em certos casos chega a ser nula, contribuindo para um deficiente escoamento das águas que caem sobre o pavimento.

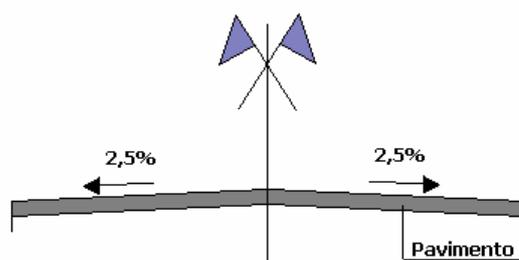


Figura 5.7 – Pente transversal de uma estrada

Para se conseguir que a E.N. 119 seja dotada de inclinação transversal, é imprescindível a colocação de uma camada de regularização de espessura média variável ao longo de toda a sua extensão.

Com as camadas previstas, tanto na solução 1 como na solução 2, era inexequível atribuir à estrada a já referida inclinação.

Assim, a Direcção de Estradas de Santarém adaptou a solução 1 e 2 ao problema existente, acrescentando uma camada de regularização, obtendo mais duas soluções 3 e 4, as quais se descrevem de seguida:

d) Solução 3 - Reforço do pavimento com misturas betuminosas convencionais - Direcção de Estradas de Santarém

A colocação da camada de regularização era dispensável a nível de reforço do pavimento, todavia era necessária, pois a estrada pode ser assim dotada da devida inclinação, permitindo que a água se escoe mais rapidamente, evitando-se assim os problemas de hidroplanagem, aumentando consequentemente a segurança dos condutores.

Do ponto de vista económico, a inclinação da estrada também contribui para a integridade estrutural do pavimento, ou seja, como permite o escoamento rápido da água, evita que esta se infiltre e atinja as camadas inferiores, diminuindo posteriormente a capacidade de carga. Embora a camada de regularização fosse prescindível, uma vez que o dimensionamento elaborado apresentava uma estrutura capaz de resistir às solicitações previstas, a colocação desta camada não prejudica a estrutura, a sua colocação fará com que exista ainda um maior incremento da resistência da capacidade de suporte do pavimento.

- Secção Corrente

Camada de desgaste em betão betuminoso	5 cm
Rega de colagem	-
Camada de regularização em mistura betuminosa densa	6 cm (média)
Rega de colagem	-
Reperfilamento do pavimento existente com mistura betuminosa densa nas zonas com bordos deformados, incluindo rega de colagem	Var.
Reposição em mistura betuminosa densa	5 cm
Colocação de geotêxtil impregnado	-
Fresagem do pavimento	5 cm

Quadro 5.21 – Solução 3 - secção corrente⁸⁴

- Secção entre o km 46+000 e o km 47+000

Tal como nas duas soluções apresentadas pela RECIPAV, esta alternativa também considerou uma estrutura diferente, devido ao pavimento nesse troço apresentar muitas patologias em avançado estado de degradação.

Esta solução baseia-se na solução 1, apresentada pela RECIPAV, apenas com o acréscimo da camada de regularização.

Camada de desgaste em betão betuminoso	5 cm
Rega de colagem	-
Camada de regularização em mistura betuminosa densa	6 cm
Rega de colagem	-
Reposição com mistura betuminosa densa	5 cm
Colocação de geotêxtil impregnado	-
Fresagem do pavimento	5 cm

Quadro 5.22 – Solução 3 - secção entre o km 46+000 e km 47+000⁸⁵

- **Solução 4 - Reforço do pavimento com misturas betuminosas com betume modificado com borracha - Direcção de Estradas de Santarém**

A solução 4 foi uma adaptação da solução 2 apresentada pela RECIPAV, com o acréscimo da camada de regularização em mistura betuminosa densa. A colocação dessa camada justifica-se devido a dotar a E.N. 119 de inclinação transversal, como já foi referido na solução 3.

⁸⁴ Adaptado de [Barros, 2005]

⁸⁵ Adaptado de [Barros, 2005]

- Secção Corrente

Camada de desgaste em MBR-BMB	4 cm
Rega de colagem com emulsão modificada	-
Camada de regularização em mistura betuminosa densa	6 cm (média)
Rega de colagem	-
Reperfilamento do pavimento existente com betão betuminoso 0/10 na espessura média de 3 cm incluindo rega de colagem	3 cm (média)
Reperfilamento do pavimento existente com betão de regularização nas zonas com bordos deformados, incluindo rega de colagem	-
Reposição com mistura betuminosa densa	5 cm
Rega de colagem	-
Fresagem do pavimento	5 cm

Quadro 5.23 – Solução 4 - secção corrente⁸⁶

- Secção entre o km 46+000 e o km 47+000

Tal como nas duas soluções apresentadas pela RECIPAV, esta alternativa também considerou uma estrutura diferente, devido ao pavimento nesse troço apresentar muitas patologias em avançado estado de degradação. Esta solução baseia-se na solução 2, apresentada pela RECIPAV, apenas com o acréscimo da camada de regularização.

Camada de desgaste em MBR-BMB	4 cm
Rega de colagem com emulsão modificada	-
Camada de regularização em mistura betuminosa densa	6 cm
Rega de colagem	-
Reposição em mistura betuminosa densa	5 cm
Rega de colagem	-
Fresagem do pavimento	5 cm

Quadro 5.24 – Solução 4 - secção entre o km 46+000 e km 47+000⁸⁷

e) Solução comum a todas as soluções (tratamento de raízes e alargamentos)

Para uma correcta definição das ligações, existiu, na maior parte dos casos, a necessidade de recorrer a alargamentos, adoptando-se uma estrutura diferente para esses casos de modo a apresentar uma capacidade de suporte compatível com o tráfego previsto na E.N.119.

Devido ao aparecimento de várias deformações e fendilhações em locais onde existem muitas árvores, este projecto contempla, após a abertura de vala e corte de raízes, a reconstrução do pavimento. Assim, nos casos de alargamentos e nos locais onde se irá proceder ao corte de raízes, a estrutura a adoptar é a seguinte:

⁸⁶ Adaptado de [Barros, 2005]

⁸⁷ Adaptado de [Barros, 2005]

Camada em macadame betuminoso	14 cm
Rega de impregnação	-
Camada de base em agregado britado de granulometria extensa	20 cm
Camada de sub-base em agregado britado de granulometria extensa	20 cm
Saneamento do pavimento, para tratamento das zonas de influência das raízes	Var.

Quadro 5.25 – Soluções 1, 2, 3 e 4 - tratamento de raízes e alargamentos

Nas soluções alternativas apresentadas pela Direcção de Estradas de Santarém, estas previram, como se pode observar nos quadros anteriores, a realização de trabalhos preparatórios, como a fresagem e o reperfilamento.

5.7.2 Análise de Custos das Soluções Projectadas

No entanto a análise das soluções do pavimento da E.N. 119 não se focou apenas na estrutura, a análise de custos foi fundamental. De acordo com as soluções anteriormente apresentadas, apresentam-se de seguida os custos.

a) Solução 1 - Reforço do pavimento com misturas betuminosas convencionais

Descrição de Trabalhos	Unidades	Quantidades
Secção Corrente		
Camada de desgaste em betão betuminoso	5 cm	m ² 164.675
Rega de colagem	-	m ² 164.675
Reperfilamento do pavimento existente com mistura betuminosa densa nas zonas com bordos deformados, incluindo rega de colagem	Var.	ton 400
Reposição com mistura betuminosa densa	5 cm	m ² 82.338
Colocação de geotêxtil impregnado	-	m ² 82.338
Fresagem do pavimento	5 cm	m ² 82.338
Secção entre o km 46+000 e o km 47+000		
Camada de desgaste em betão betuminoso	5 cm	m ² 10.400
Rega de colagem	-	m ² 10.400
Reposição com mistura betuminosa densa	5 cm	m ² 10.400
Colocação de geotêxtil impregnado	-	m ² 10.400
Fresagem do pavimento	5 cm	m ² 10.400
Tratamento de Raízes		
Camada em macadame betuminoso	14 cm	m ² 3.000
Rega de impregnação	-	m ² 3.000
Camada de base em agregado britado de granulometria extensa	20 cm	ton 3.000
Camada de sub-base em agregado britado de granulometria extensa	20 cm	ton 3.000
Saneamento do pavimento, para tratamento das zonas de influência das raízes	Var.	m ² 3.000
		Valor Total = 1.082.868,00 €

Quadro 5.26 – Solução 1 - valor total

b) Solução 2 - Reforço do pavimento com misturas betuminosas com betume modificado com borracha

Descrição de Trabalhos		Unidades	Quantidades
Secção Corrente			
Camada de desgaste em MBR -BMB	4 cm	m ²	164.675
Rega de colagem com emulsão modificada	-	m ²	164675
Reperfilamento do pavimento existente com betão betuminoso 0/10 na espessura média de 3 cm incluindo rega de colagem	3 cm (média)	ton	600
Reperfilamento do pavimento existente com betão de regularização nas zonas com bordos deformados, incluindo rega de colagem	-	ton	400
Reposição com mistura betuminosa densa	5 cm	m ²	8.234
Rega de colagem	-	m ²	8.234
Fresagem do pavimento	5 cm	m ²	8.234
Secção entre o km 46+000 e o km 47+000			
Camada de desgaste em MBR-BMB	4 cm	m ²	10.400
Rega de colagem com emulsão modificada	-	m ²	10.400
Reposição com mistura betuminosa densa	5 cm	m ²	10.400
Rega de colagem	-	m ²	10.400
Fresagem do pavimento	5 cm	m ²	10.400
Tratamento de Raízes			
Camada em macadame betuminoso	14 cm	m ²	3.000
Rega de impregnação	-	m ²	3.000
Camada de base em agregado britado de granulometria extensa	20 cm	ton	3.000
Camada de sub-base em agregado britado de granulometria extensa	20 cm	ton	3.000
Saneamento do pavimento, para tratamento das zonas de influência das raízes	Var.	m ²	3.000
			Valor Total = 1.059.135,00 €

Quadro 5.27 – Solução 2 - valor total

A solução 1 e 2 apresentam custos de construção muito semelhantes, havendo todavia uma ligeira economia na solução 2 (BMB) em relação à solução 1 (convencional). A relação custo/benefício dessa solução é consideravelmente mais vantajosa do que a solução 1, uma vez que foi dimensionada para o mesmo período de vida útil que o pavimento irá apresentar.

A utilização deste tipo de solução, com o reaproveitamento dos materiais existentes e com a valorização do granulado de borracha, constitui uma ferramenta muito importante para assegurar, nesta área, o crescimento sustentável do País.

Embora a solução 2 apresente uma série de vantagens, tal situação não contemplava a resolução das empenas transversais da E.N. 119.

Assim, foram ainda realizados dois estudos alternativos às soluções 1 e 2, os quais contemplam a colocação de uma camada de regularização para dotar a estrada das respectivas inclinações. Essas quantidades e o respectivo custo apresentam-se nos Quadro 5.28 (solução 3) e Quadro 5.29 (solução 4).

c) Solução 3 - Reforço do pavimento com misturas betuminosas convencionais - Direcção de Estradas de Santarém

Descrição de Trabalhos		Unidades	Quantidades
Secção Corrente			
Camada de desgaste em betão betuminoso	5 cm	m ²	164.675
Rega de colagem	-	m ²	164.675
Camada de regularização em mistura betuminosa densa	6 cm	m ²	164.675
Rega de colagem	-	m ²	164.675
Reperfilamento do pavimento existente com mistura betuminosa densa nas zonas com bordos deformados, incluindo rega de colagem	Var.	ton	400
Reposição em mistura betuminosa densa	5 cm	m ²	8.234
Colocação de geotêxtil impregnado	-	m ²	8.234
Fresagem do pavimento	5 cm	m ²	8.234
Secção entre o km 46+000 e o km 47+000			
Camada de desgaste em betão betuminoso	5 cm	m ²	10.400
Rega de colagem	-	m ²	10.400
Camada de regularização em mistura betuminosa densa	6 cm	m ²	10.400
Rega de colagem	-	m ²	10.400
Reposição com mistura betuminosa densa	5 cm	m ²	10.400
Colocação de geotêxtil impregnado	-	m ²	10.400
Fresagem do pavimento	5 cm	m ²	10.400
Tratamento de raízes e alargamentos			
Camada em macadame betuminoso	14 cm	m ²	3.000
Rega de impregnação	-	m ²	3.000
Camada de base em agregado britado de granulometria extensa	20 cm	m ²	3.000
Camada de sub-base em agregado britado de granulometria extensa	20 cm	m ²	3.000
Saneamento do pavimento, para tratamento das zonas de influência das raízes	Var.	m ²	3.000
			Valor Total = 1.323.799,30 €

Quadro 5.28 – Solução 3 - valor total

d) Solução 4 - Reforço do pavimento com misturas betuminosas com betume modificado com borracha - Direcção de Estradas de Santarém

Descrição de Trabalhos		Unidades	Quantidades
Secção Corrente			
Camada de desgaste em MBR -BMB	4 cm	m ²	164.675
Rega de colagem com emulsão modificada	-	m ²	164675
Camada de regularização em mistura betuminosa densa	6 cm	m ²	164.675
Rega de colagem	-	m ²	164.675
Reperfilamento do pavimento existente com betão betuminoso 0/10 na espessura média de 3 cm incluindo rega de colagem	3 cm (média)	ton	600
Reperfilamento do pavimento existente com betão de regularização nas zonas com bordos deformados, incluindo rega de colagem	-	ton	400
Reposição com mistura betuminosa densa	5 cm	m ²	8.234
Rega de colagem	-	m ²	8.234
Fresagem do pavimento	5 cm	m ²	8.234
Secção entre o km 46+000 e o km 47+000			
Camada de desgaste em MBR-BMB	4 cm	m ²	10.400
Rega de colagem com emulsão modificada	-	m ²	10.400
Camada de regularização em mistura betuminosa densa	6 cm	m ²	10.400
Rega de colagem	-	m ²	10.400
Reposição com mistura betuminosa densa	5 cm	m ²	10.400
Rega de colagem	-	m ²	10.400
Fresagem do pavimento	5 cm	m ²	10.400
Tratamento de Raízes			
Camada em macadame betuminoso	14 cm	m ²	3.000
Rega de impregnação	-	m ²	3.000
Camada de base em agregado britado de granulometria extensa	20 cm	ton	3.000
Camada de sub-base em agregado britado de granulometria extensa	20 cm	ton	3.000
Saneamento do pavimento, para tratamento das zonas de influência das raízes	Var.	m ²	3.000
			Valor Total = 1.689.405,00 €

Quadro 5.29 – Solução 4 - valor total

O que se pode concluir comparando os custos, a solução 2 (BMB), apresenta os custos de construção mais baixos.

Contudo, é de referir que em termos comparativos ter-se-á que confrontar as soluções que contemplam a camada de regularização, pois só essas soluções é que se adequam aos problemas efectivos da E.N. 119. Ou seja, a comparação terá que ser realizada entre a solução 3 (Quadro 5.28) e a solução 4 (Quadro 5.29).

Após análise de ambos os casos, pode-se referir que ambos os casos respondem às exigências da E.N. 119, no entanto, a solução 3 apresenta os custos mais baixos.

Foi com base nesta conclusão que a Direcção de Estradas de Santarém optou para reforçar o pavimento da E.N. 119 com a solução 3.

O recurso a uma solução com BMB, teria como objectivo dotar a E.N. 119, de uma mistura betuminosa com elevada resistência à propagação de fendas e ao envelhecimento. Porém, a solução 3, apresenta 0,11 m de misturas betuminosas, que também contribuem para um retardamento da propagação das fissuras. De salientar, o facto, da solução 3 também complementar trabalhos preparatórios, como fresagem, colocação de geotêxtil e reperfilamento do pavimento. A fresagem e a colocação do geotêxtil, foram contabilizadas como medidas auxiliares que irão funcionar como retardadores de fendas nas zonas onde o pavimento apresentava fendilhamento acentuado.

5.8 Conclusões

A reabilitação da E.N. 119 baseou-se na melhoria das características estruturais, devido à deficiente conservação periódica. Esta situação repete-se em muitas das estradas nacionais. Para colmatar esta situação, um sistema de gestão de conservação é essencial. Intervindo na estrada atempadamente na resolução de pequenos problemas, afasta-se a necessidade de recorrer a intervenções mais profundas.

Embora na E.N. 119, se tenha verificado que o recurso a misturas com BMB, não era a solução mais indicada, no que concerne ao aspecto económico, existem inúmeras situações em que na reabilitação e na construção de estradas se pode recorrer à aplicação de misturas com BMB, com viabilidade económica e técnica comprovada.

Apesar das diversas vantagens que as técnicas de reabilitação com BMB apresentam, essas têm que ser sempre comparadas com as técnicas de reabilitação convencionais, pois na maioria dos casos, a opção do tipo de soluções depende de um equilíbrio técnico-económico.

Com o caso de estudo, confirmou-se a necessidade de realizar todos os estudos prévios, de modo a obter um diagnóstico que permita realizar um projecto que vá de encontro à resolução adequada dos problemas existentes nas estradas.

Capítulo 6

CONCLUSÃO

6.1 Introdução

As estradas desempenham um papel fundamental no crescimento global de qualquer país. Uma rede viária bem estruturada permite a articulação rápida de pessoas e mercadorias. A articulação só se realiza eficazmente, quando as estradas oferecem aos utentes, conforto, economia e segurança. Essas qualidades nem sempre estão patentes. As estradas, após a construção, com o passar do tempo, e devido às suas estruturas estarem sujeitas a diversas solicitações, e sem apoio de uma conservação/manutenção periódica, começam a sofrer alterações ao nível da superfície e da estrutura, afectando a condução dos seus utentes.

Finda a construção de uma estrada, a sua qualidade deve ser imediatamente avaliada com o objectivo de conhecer o estado do pavimento. Contudo, a avaliação da qualidade deve ser contínua ao longo do período de vida da estrada.

A avaliação/análise sistemática permanente concede a possibilidade de obter parâmetros que permitem reprogramar medidas de reabilitação, conhecer dados para a melhoria das técnicas, tanto de construção como de reabilitação, fornecem dados para sistemas de gestão de pavimentos e permitem avaliar as opções de projecto.

A avaliação do estado do pavimento deve ser feita a nível das características superficiais e estruturais.

A avaliação das características superficiais assenta na verificação da regularidade, da derrapagem (conferida pela textura), do ruído e das condições de drenagem das águas superficiais. Ou seja, tenta-se detectar problemas/patologias existentes na superfície do pavimento, que afectam as características anteriormente referidas. A falta de características superficiais afecta a condução dos utentes da estrada, na medida em que não a percorrem com comodidade, segurança e economia. As características superficiais podem ser analisadas através de técnicas e equipamento apropriado. Quanto à avaliação das estruturais, esta também é efectuada mediante equipamento adequado. Esta análise baseia-se na avaliação da capacidade de carga dos pavimentos.

As características estruturais estão interligadas com as características superficiais. Quando o pavimento apresenta patologias que prejudicam as características estruturais, estas vão-se manifestar

na superfície do pavimento. O inverso também sucede, porque os problemas superficiais, como por exemplo as fendas, contribuem para a degradação das características estruturais.

A avaliação periódica das características superficiais e estruturais serve de apoio à tomada de decisão de quando e quanto se deve proceder à reabilitação de uma forma rentável.

A apreciação do pavimento pode indicar que é fundamental recuperar a sua qualidade inicial, sempre que esse ostente demasiadas degradações que se consideram inaceitáveis, quando apresenta uma capacidade de carga insuficiente, quando as medidas de conservação são excessivas e insustentáveis, quando o nível de segurança e comodidade são insuficientes e quando os custos intrínsecos aos condutores são intolerantes.

A atribuição de novas características a um pavimento que se encontra degradado tanto superficial, como estruturalmente, consegue-se à custa de colocação de novos materiais. A nova estrutura é obtida através de um estudo de dimensionamento de reforço. Para realizar esse dimensionamento, é necessário conhecer as técnicas e os materiais que se consideram mais ajustados ao pavimento em estudo.

As técnicas de reabilitação de um pavimento normalmente implicam a melhoria das suas características superficiais e estruturais em simultâneo. A melhoria das características superficiais assegura a melhoria do comportamento estrutural ao passo que a melhoria das deficiências estruturais, à custa da colocação de novas camadas, garante a melhoria das características superficiais.

Todavia, é bastante importante distinguir a reabilitação das características superficiais das estruturais, pois cada estrada requer a execução de um diagnóstico prévio das degradações da estrutura e da constituição das camadas do pavimento, do tráfego, do clima, ou seja, de dados que sirvam de apoio à decisão quanto à técnica de reabilitação mais apropriada.

Existem inúmeras técnicas de reabilitação e essas têm evoluído por forma a responder eficazmente aos problemas existentes nos pavimentos, atribuindo-lhes novas propriedades que possibilitam aumentar o seu período de vida.

É nesse seguimento, que se abordam, nesta dissertação, várias técnicas de reabilitação de pavimentos, evidenciando as vantagens da aplicação de misturas betuminosas com BMB na construção e sobretudo na reabilitação de pavimentos.

A modificação do betume com a adição de borracha atribui uma série de propriedades físicas e reológicas superiores às existentes nos betumes puros (não modificados), que se reflectem directamente na durabilidade do pavimento. Este aspecto é fundamental nos nossos dias, pois existe a necessidade de produzir misturas menos sujeitas às variações climáticas, mais resistentes à acção do tráfego, de maior durabilidade, mais ecológicas e consequentemente com custos reduzidos.

O BMB obtém-se a partir de vários métodos de fabrico: via húmida, via seca e via mista. Contudo, o mais utilizado é método por via húmida, que pode ser dividido em duas vertentes de fabrico: fabrico in situ/central betuminosa e em fábrica/refinaria.

Também a obtenção do granulado de borracha, se procede segundo dois processos: trituração criogénica e trituração ambiental.

Dependendo do processo escolhido para a obtenção do granulado de borracha e consoante o método de fabrico, obtêm-se misturas betuminosas, com características muito distintas e conseqüentemente com aplicações diferentes.

Existem várias empresas que produzem o BMB em Portugal, todas elas produzem o BMB pelo método de fabrico via húmida, todavia, apresentam produtos finais distintos, os quais podem ser aplicados consoante os problemas existentes em obra.

Paralelamente, as técnicas utilizadas recorrendo ao BMB, têm a vantagem de beneficiar o interesse ambiental e económico, no sentido em que colaboram para o decrescente número de resíduos de pneus, existentes em aterros ou em locais inadequados, diminuído assim os acidentes ecológicos.

Com o conhecimento generalizado de várias técnicas de reabilitação, inclusive das que recorrem ao BMB, torna-se mais fácil a escolha da técnica que possibilita dotar o pavimento com novas características, semelhantes às iniciais.

Verificou-se pelo exposto no capítulo 5 deste trabalho que a decisão da reabilitação mais adequada, nem sempre está dependente das decisões técnicas, na maioria dos casos tem de ser integrada num determinado contexto económico, ou seja, as soluções na maioria dos casos advêm de um equilíbrio técnico-económico.

6.2 O Trabalho Desenvolvido

No caso de estudo foram abordados vários conceitos citados ao longo dos vários capítulos constituintes desta dissertação.

O caso de estudo foi desenvolvido com base no Projecto de Beneficiação da E.N. 119. O estudo desse projecto foi intencional pois permitiu um acompanhamento de várias etapas que serviram de ajuda à tomada de decisão quanto à técnica de reabilitação mais adequada.

No caso de estudo compararam-se essencialmente 2 cenários de reabilitação do pavimento: reabilitação do pavimento recorrendo às misturas betuminosas convencionais e reabilitação do pavimento recorrendo a misturas com BMB de elevado conteúdo de borracha.

Nessa comparação esteve presente o maior desafio encontrado durante a elaboração desta dissertação, tendo em vista as inúmeras vantagens e desvantagens de cada uma das técnicas de reabilitação face aos problemas encontrados na E.N. 119.

Considerou-se como alternativa a uma reabilitação com misturas betuminosas convencionais a aplicação de misturas betuminosas com BMB com elevada percentagem de borracha, devido ao pavimento da E.N. 119 apresentar uma grande percentagem de fissuras. Pelo que já foi exposto nesta dissertação, as misturas com BMB com elevado teor de borracha apresentam uma elevada resistência à fadiga e à reflexão de fendas, o que se traduz numa maior durabilidade do pavimento.

O caso de estudo permitiu também abordar a questão económica, no sentido em que se concluiu que a escolha da técnica de reabilitação pode provir muito dos custos a curto e longo prazo dependendo da importância da estrada.

Embora na E.N. 119 se tenha verificado que o recurso a misturas com BMB com elevada percentagem de borracha não era adequado, pelo elevado valor envolvido, existem inúmeras situações em que na reabilitação e na construção de estradas se pode recorrer à aplicação de misturas com BMB, com viabilidade económica comprovada.

A viabilização de utilização de BMB de elevada percentagem de borracha pode passar pelo decréscimo dos custos de produção, associado a um maior volume de empreitadas de reabilitação a colocar em concurso recorrendo a estas técnicas.

Pode passar pela obrigatoriedade de nas obras públicas ter de usar uma determinada percentagem de materiais recicláveis, ou a limitação do recurso a vazadouros, ou a limitação certas percentagens de novos materiais.

De referir que a utilização do BMB contribui para um benefício ecológico e social já exposto e se, na reabilitação de um pavimento, o BMB for utilizado nas técnicas de reciclagem, o contributo ecológico será maior.

A reabilitação da E.N. 119 assentou sobretudo na melhoria das características estruturais, devido à deficiente conservação periódica. Esta situação repete-se em muitas estradas nacionais. Para colmatar esta situação, um sistema de gestão da conservação é essencial. Conseguindo intervir na estrada atempadamente na resolução de pequenos problemas, prolonga-se a necessidade de recorrer a intervenções de fundo.

Com este caso de estudo, confirmou-se a necessidade de realizar todos os estudos prévios, de modo a obter um diagnóstico que permita realizar um projecto que vá de encontro à resolução adequada dos problemas existentes na estrada.

6.3 Futuros Desenvolvimentos

Em termos de reabilitação de pavimentos, existem inúmeras técnicas que ultimamente têm sofrido grandes avanços. Cada vez é mais notória a existência de novos materiais, como por exemplo o BMB, capazes de resistir a solicitações cada vez mais adversas, como o aumento do tráfego, clima com amplitudes térmicas maiores.

A utilização de BMB em misturas betuminosas nas técnicas de reabilitação e na construção de pavimentos, tem sido estudada e têm-se obtido grandes avanços na investigação mundial, contudo em Portugal essa ainda é muito diminuta. A investigação e aplicação em Portugal das misturas betuminosas recorrendo nomeadamente ao BMB têm também que acompanhar esse desenvolvimento. Neste conceito é particularmente relevante:

- Embora mundialmente existam estudos de como se comportam as misturas com BMB, em Portugal, os resultados podem ser diferentes devido a ter características próprias, como o clima e o volume de tráfego, assim torna-se essencial estudar o comportamento dessas misturas.
- As estradas a beneficiar, devem ser divididas em várias secções, em que se procede a um tipo de reabilitação e/ou construção diferente em cada uma delas, para futura análise e posterior classificação das técnicas e materiais utilizados. Assim, em condições semelhantes um estudo

de reabilitação de pavimentos pode-se basear nessa informação e adoptá-la como solução do seu problema;

- Actualmente em Portugal já foram construídas e reabilitadas estradas com BMB, essas podem-se considerar uma fonte de informação se se proceder a uma avaliação contínua do seu funcionamento e das suas reacções a diversas solicitações;
- Pesquisas com análise de dados, a comprovar que a aplicação do BMB resulta melhor do que a aplicação de betumes convencionais, apoiam a decisão de recorrer às técnicas com BMB;
- Existe a necessidade, para que não exista nenhuma dúvida sobre a qualidade dos produtos provenientes da borracha, que seja concluído um processo de homologação/certificação;
- A introdução, nos cadernos de encargos das obras públicas, a obrigatoriedade de um consumo mínimo de materiais recicláveis, como a borracha reciclada em pavimentos;
- A reabilitação do pavimento através de técnicas de reciclagem com BMB, deve ser considerada como uma solução ambientalmente correcta, uma vez que a estrada é melhorada com os seus próprios materiais constituintes e é melhorada com o recurso de BMB, aproveitando os resíduos de pneus;
- Para que o BMB tenha sucesso no mercado consumidor, a melhoria no desempenho dos pavimentos deve compensar qualquer acréscimo nos custos associados à incorporação de borracha nos betumes.

Para concluir, é de referir que o BMB utilizado nas técnicas de reabilitação de pavimento pode atribuir-lhes características excepcionais. Contudo, existem técnicas de reabilitação aplicadas em conjunto ou em separado, que também têm certas vantagens, tais como, por exemplo, as técnicas de reciclagem.

Torna-se extremamente importante detectar os problemas existentes da estrada, as suas origens de modo a resolvê-los recorrendo à técnica de reabilitação mais adequada, tendo sempre em consideração os custos a curto, médio e longo prazo.

BIBLIOGRAFIA

- Amaral, 2000 Amaral, Simonne da Costa.: “ *Estudos de Misturas Asfálticas Densas com Agregados do Estado do Pará, Utilizando asfalto Convencional (CAP-40) e Asfalto Modificado com Polímero SBS (Betufex B 65/60)*”, Departamento de Transportes, Escola de Engenharia de São Paulo, Universidade de São Paulo, 2000.
- Anderson *et al.*,
2000 Anderson, J.; Pampulim, V.; Saim, R. e Sousa, Jorge B.: “ *Asphalt Rubber laboratory properties related to type and process technology of crumb rubber*”, Prodeedings and of the Asphalt Rubber 2000 Conference, Vilamoura, 2000.
- Antunes e Sousa,
2005 Antunes, Inês; Sousa, Jorge B.: “ *Caracterização reológica de betumes modificados CRM sujeitos a envelhecimento artificial*”.
- Arizona DOT, 1996 Arizona DOT: “ *Standard Specifications for Road and Bridge Construction, Section 413 - Asphaltic Concret (Asphalt Rubber), Section 414 - Asphaltic Concrete Friction Course (Asphalt Rubber) and Sectio 1009 - Asphalt-Rubber Material*”, Department of Transportation, E.U.A., 1996.
- Asefma, 2005 Aasefma: “ *Panorámica Actual de Las Mezclas Bituminosas. Asefma, Un Nuevo Enfoque*”, Comunicación Libre – Regeneración del Betún de los Fresados para El Rejuvenecimiento Químico de Todos los Viejos Aglomerados, Asefma, 2005.
- Asefma, 2005 Aasefma: “ *Panorámica Actual de Las Mezclas Bituminosas. Asefma, Un Nuevo Enfoque*”, Comunicación Libre – Betunes Modificados Estables al Almcenamamiento Mediante el Empleo de Polvo de Caucho Reactivado Procedente de NFU’s, Para su Uso en Carreteras, Asefma, 2005.
- Asphalt Academy,
2001 Asphalt Academy: “ *Technical Guideline: The Use of Modified Bituminous Binders in Road Construction*”, Pretoria/South Africa, 2001.
- Asphalt Institute,
1995 Asplhalt Institute: *Performance graded Asphalt Binder Specification and testing*”, 1995.

Disponível em: www.asphaltinstitute.org
- Asphalt Org., 2005 Asphalt Org - International Society for Asphalt Pavements.

Disponível em: www.asphalt.org
- Azevedo, 2000/2001 Azevedo, Maria da Conceição Monteiro: Apontamentos das Aulas da Disciplina de Pavimentos do Mestrado e Vias de Comunicação, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2000/2001.
- Azevedo, 2001 Azevedo, Maria da Conceição Monteiro: Apontamentos das Aulas da Disciplina de Projecto Integrado de Estradas, Instituto Superior Técnico, Lisboa , 2001.
- Azevedo, 2001 Azevedo, Maria da Conceição Monteiro: “ *Inflência das Características dos Pavimentos na Segurança*”, Comunicação, 1º Congresso de Segurança Rodoviária em Meio Urbano, Laboratório de Engenharia Civil, Lisboa, 2001.

- Azevedo, 2001 Azevedo, Maria da Conceição Monteiro: “*Des Niveaux de Service et des Innovations pour Repondre aux Attentes des Usagers*”, XXII Congresso Mundial da AIPRC – Relatório Português ao Tema Estratégico TS1, Lisboa, 2001.
- Azevedo, 2004 Azevedo, Maria da Conceição Monteiro: “*Sistema de Gestão de Pavimentos*”, Manual de Utilização, EP – Estradas de Portugal, E.P.E., Almada, 2004.
- Azevedo, 2005 Azevedo, Maria da Conceição Monteiro: “*Dimensionamento do Reforço de Pavimentos – Introdução*”, Curso – Conservação de Estradas, EP – Estradas de Portugal, E.P.E., Almada, 2005.
- Azevedo, 2004 Azevedo, Maria da Conceição Monteiro: “*Reciclagem de Pavimentos a Quente em Central*”, Curso – Conservação de Estradas, EP – Estradas de Portugal, E.P.E., Almada, 2005.
- Azevedo, 2005 Azevedo, Maria da Conceição Monteiro: “*Dimensionamento do Reforço de Pavimentos – Introdução*”, Curso – Conservação de Estradas: Noções Gerais e Controlo de Qualidade de Obra, EP – Estradas de Portugal, E.P.E., Almada, 2005.
- Azevedo e Cardoso, 2003 Azevedo, Maria da Conceição Monteiro; Mário Cardoso: *Reciclagem a Quente em Central Betuminosa*, II Jornadas Técnicas de Pavimentos Rodoviários – Reciclagem de Pavimentos, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2003.
- Baptista, 2005 Baptista, Teresa: “*BMB - Sua Utilização em Pavimentos Rodoviários - Volume I*”, Departamento de Engenharia Geotécnica, Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2005.
- Barbosa, 1984 Barbosa, L.: “*O Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis, de Estradas e de Aérodromos e dos seus Reforços*”, Dissertação para obtenção do grau Mestre em Mecânica dos solos, Universidade Nova de Lisboa, 1984.
- Barradas, 2004 Barradas, Luís C.S.: “*Integração Inter-Empresarial do Negócio em Rede*”, Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Electrónica e Computadores (Área de Especialização de Sistemas Digitais e Informática Industrial), Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2004.
- Barros, 2005 Barros, Rui: *E.N. 119 - Beneficiação entre a Rotunda do Infantado e Coruche - Estudo de pavimentação*, 2005.
- Batista, 2004 Batista, Fátima A. B. Antunes: “*Novas Técnicas de Reabilitação de Pavimentos*”, Dissertação para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2004.
- Berg, 1984 Berg, F.: “*Georadar, Geological Applications of Soil Radar Data*”, National Road Laboratory on the IESTD International Conference on Roads and Development, Paris, 1984.
- Blacklidge Emulsions, 2002 Blacklidge Emulsions Inc.. Disponível em <http://www.blacklidgeemulsions.com>
- Botasso *et al.*, 2003 Botasso, Hugo Gerardo ; González, Ruben Osmar; Rivera, José Julián; Rebollo, Oscar Raúl: *Utilización de Cauchos em mezclas asfálticas*, Facultad Regional la Plata – Universidade Tecnológica Nacional, 2003.
- Burger *et al.*, 2003 Burger, A. F.; Van De Ven, m. F. C.; Jenkins, K. J.: “*Rheology of Betumen-Rubber – Comparative study*”, Proceedings and of the Asphalt Rubber 2003 Conference, Brasília.

- Certiprojecto, 2004 Certiprojecto (Arquitectos e Engenheiros Consultores , Lda) "Avaliação do Efeito do Pavimento no Ruído de Tráfego Rodoviário – Relatório de Ensaios – Pavimento BMB versus Pavimento BAC", com a colaboração das Auto-Estradas do Atlântico, 2004.
- Coelho, 1996 Coelho, V.: *Contribuição ao Estudo das Deformações Permanentes, nas Condições do Brasil, em Camadas de Concreto Asfáltico de Pavimentação*", Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996.
- DNER, 1998 Departamento Nacional de Estradas de Rodagem: *Pesquisa de Asfaltos Modificados com Polímeros –Relatório Final*", Directoria do Desenvolvimento Tecnológico, Ministério dos Transportes, 1998.
- E.P., 2005 E.P. – Estradas de Portugal, E.P.E., Recenciamentos de Tráfego. Disponível em: <http://intranet3.i.estradas.pt>
- Estakhri, 1992 Estakhri, C. K. : *Use, Availability, and Cos-Effectiveness of Asphalt Rubber in Texas*", Washington, 1992.
- Fonseca, 2004 Fonseca, Paulo: "A Utilização do Betume Modificado com Borracha em Portugal: Balanço de 5 Anos de Experiência", 2004.
- Fonseca, 2004 Fonseca, Paulo: "A Utilização do Betume Modificado com Borracha Reciclada de Pneus em Portugal", RECIPIAV, Cartaxo, 2004.
- Fonseca, 2005 Fonseca, Paulo: "Propriedades do Betume Modificado com Borracha (BMB) e das Misturas Betuminosas com BMB", Jornadas de Normalização, EP – Estradas de Portugal, E.P.E., Almada, 2005.
- Fonseca, 2005 Fonseca, Paulo: "Betume Modificado com Borracha Reciclada de Pneus: Uma Novidade com 40 Anos de Utilização", 2005.
- Fonseca, 2005 Fonseca, Paulo: "A Utilização do Betume Modificado com Borracha (BMB) em Portugal: A Experiência Adquirida ao Longo de 7 Anos nas Obras em Serviço", Almada, 2005.
- Goodyear, 1999 Goodyear: *Charles Goodyear and the Strange Story of Rubber*".
Disponível em: <http://www.goodyear.com>
- Harring *et al*, 1994 Harring, E. T. *et al*: "The SUPERPAVE Mix Design System Manual of Specifications, Test Methods, and Practices", Strategic Highway Research Program, Washington, DC: National Research Council, 1994.
- Hass e Hudson, 1978 Hass, R., Hudson R.: "Pavement Management System", McGraw-Hill, 1978.
- Heitzman, 1992 Heitzman, M. Design and Construction of Asphalt Paving Materials with Crumb Rubber Modifier, TBR, Washington, DC, 1992.
- Hicks *et all*, 1995 Hicks, R. G. *et all*: *Crumb Rubber Modifier (CRM) in Asphalt Pavement: Summary of Practices in Arizona, California, and Florida*", 1995
- IDU, 2005 Instituto Desarrollo Urbano. Disponível em <http://www.idu.gov.co>
- IRC, 2005 Institute for Research in Construction.
Disponível em <http://irc.nrc.cnrc.gc.ca/cbd/cbdo38e.html>

- Jacinto, 2003 Jacinto, Manuel António Sobral Campos: “*Caracterização Estrutural de Pavimentos*”, Dissertação para obtenção do grau Mestre em Vias de Comunicação, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2003.
- Júnior, 2004 Júnior, Armando Morilha: “*Estudo sobre a Acção de Modificadores no Envelhecimento dos Ligantes Asfálticos e nas Propriedades Mecânicas e de Fadiga das Misturas Asfálticas*”, Dissertação para a obtenção do grau Mestre em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, 2004.
- Júnior e Greca, 2003 Júnior, Armando Morilha; Greca, Marcos Rogério: “*Asfalto Borracha*”, Grupo Greca Asfaltos, Brasil, 2003.
- Lima, 2003 Lima, André Theophilo: “*Caracterização Mecânica de Misturas Asfálticas Recicladas a Quente*”, Universidade Federal do Ceará, 2003.
- LNEC, 1962 LNEC- Laboratório Nacional de Engenharia Civil: “*Vocabulário de Estradas e Aeródromos*”, Espicificação E1, Lisboa, 1962.
- Macropavi, 2005 Disponível em: <http://www.macropavi.com.br>
- Martinho *et al.*, 1994 Martinho, F.G.; Montenegro, F.G.; Trajano, L.: “*Operflex Asphalt – Uma Combinação de Asfalto e Elastómero*”, Anais do 12º Encontro de Asfalto, 1994.
- Martins, 2004 Martins, Haroldo A.F.: “*A Utilização da Borracha de Pneus na Pavimentação Asfáltica*”, Trabalho para conclusão do Curso de Engenharia Civil, Universidade Anhembí Morumbi, São Paulo, 2004.
- McQuillen Júnior, 1988 McQuillen Júnior: “*Economic Analysis of Rubber- Modified Asphalt Mixes*”, Reston , 1988
- Medina e Granados, 2003 Medina, Juan Gallego; Granados, Luis de los Santos: “*Mezclas Bituminosas Fabricadas con Betunes de Alto Contenido de Caucho. Aplicación al Recrecimiento de un Pavimento Rígido en la A-7*”.
- Disponível em <http://www.ropdigital.ciccp.es>
- Medina e Muñoz, 2004 Medina, Juan Gallego; Muñoz, Jorge N. Prieto: “*Tipos de Mezclas Bituminosas con Caucho de Neumáticos. Experiência Española en la Conservación de Carreteras.*”, III Congresso Rodoviário Português – Gestão do Sistema Rodoviário, 2004.
- Merighi, 2003 Merighi, João Virgílio: “*Reciclagem a Frio com Ligantes Betuminosos – Experiência Brasileira*”, II Jornadas Técnicas de Pavimentos Rodoviários – Reciclagem de Pavimentos, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2003.
- Miranda, 2005 Miranda, Valverde: “*Reciclagem de Pavimentos “In Situ” e uma Abordagem ao tema “Reflexão de Fissuras”*”, Curso – Conservação de Estradas: Noções Gerais e Controlo de Qualidade de Obra, EP – Estradas de Portugal, E.P.E., Almada, 2005.
- Montepara e Giuliani, 1999 Montepara, A. e Giuliani F.: “*Variation on Chemical and Rheological properties of betumen due to aging action*”, International Conference: Chemistry and Ecology of composite materials based on betumen emulsions and modified betumen, Minsk, Belarus, 1999.
- Morilha e Trichês, 2003 Morilha Jr, A., Trichês, G.: “*Análise Comparativa de Envelhecimento em Laboratório de Nove Ligantes Asfálticos*”, 34ª Reunião Anual de Pavimentação, Campinas, 2003.

- Motta *et al.*, 1993 Motta, L.M.G.; Medina, J., Scalco, R.: “*O Projecto Estrutural de Pavimentos Flexíveis e a Dosagem de Misturas Asfálticas*”, 27ª Reunião Anual de Pavimentação, 1993.
- Moura e Pamplona, 2005 Moura, Jorge; Pamplona, João: Fichas Comerciais da ProbiGalp, Ligantes Betuminosos, S.A..
- Neto, 1985 Neto, J. Mascaranhas: “*Método para Construir estradas em Portugal*”, Dedicado ao Senhor D. João, Príncipe do Brasil, 1970.
- Nunes, 2005 Nunes, Hélio: “*Betume com Borracha de Pneu*”, Jornadas de Normalização, EP – Estradas de Portugal, E.P.E., Almada, 2005.
- OCDE, 1984 OCDE - Organisation de Coopération et de Développement Économiques: “*Caractéristiques de Surface des Revêtements Routiers: Leur Interaction et Leur Optimisation*”, Recherche en Matière des Routes et des Transports Routiers, 1987.
- OCDE, 1997 OCDE - Organisation de Coopération et de Développement Économiques: “*Stratégies de Recyclage dans les Travaux Routiers*”, France.
- Oda, 2000 Oda, Sandra: “*Análise da Viabilidade Técnica do Uso de Ligante Asfalto-Borracha em Obras de Pavimentação*”, Tese de Doutoramento, escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2000.
- Oda, 2003 Oda, Sandra: “*Um Breve Histórico do Desenvolvimento da Engenharia Rodoviária*”, Grupo de Tecnologia de Pavimentos, Departamento de Engenharia e Arquitectura, Universidade de Salvador, 2003.
Disponível em http://www.sandraoda.ubbi.com.br/1_hist_pav2003.pdf
- Oda e Júnior, 2001 Oda, Sandra; Júnior, José Leomar Fernandes: “*Borracha de Pneus como Modificador de Cimentos Asfálticos para uso em Obras de Pavimentação*”, Universidade Estadual de Maringá, Departamento de Engenharia Civil, 2001.
- O’Flaherty, 1988 O’ Flaherty, C.A.: “*Highway Enginneering*”, Third Edition, Volume 2, 1988.
- Pais, 2005 Pais, Jorge C.: “*Estudo da Influência do Diesel no Comportamento das Misturas Betuminosas*”, Laboratório de Pavimentos Rodoviários, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho.
- Pampulim, 2005 Pampulim, Vasco: “*Betume Modificado com Borracha – BMB – Contribuição Técnica para a sua Introdução em Portugal*”, Recipneu.
Disponível em <http://www.recipneu.com>
- Pavia, 2005 Disponível em: <http://www.pavia.sa.pt>
- Pereira e Miranda, 1999 Pereira, Paulo e Miranda, Valverde: “*Gestão da Conservação dos Pavimentos Rodoviários*”, Braga, 1999.
- Petrobras, 2005 Petrobras, Distribuidora S.A.. Disponível em: <http://www.petrobras.com.br>
- PIARC, 1995 PIARC: “*XXth World Road Congress*”, Várias Comunicações, Montréal, 1995.
- Pinelo, 1991 Pinelo, António Manuel Serrano: “*Projecto e Observação de Pavimentos Rodoviários*”, Laboratório de Engenharia Civil, 1991.

- Pinto, 2003 Pinto, Joana Baptista Rua Pinto: “*Caracterização Superficial de Pavimentos Rodoviários*”, Dissertação para obtenção do grau Mestre em Vias de Comunicação, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2003.
- Potti, 2004 Potti, Juan José: “*Betún Modificado con Polvo de Caucho de Neumáticos Fuera de Uso. Otro Tipo de Reciclaje*”, III Congresso Rodoviário Português – Gestão do Sistema Rodoviário, 2004.
- Quercus, 2005 Quercus, disponível em <http://www.quercus.sensocomum.pt>
- RECIPAV, 2005 RECIPAV - Engenharia e Pavimentos, Lda., Grupo Águas do Centro.
Disponível em <http://www.recipav.com>
- Recipneu, 2005 Recipneu. Disponível em <http://www.recipneu.com>
- Ribeiro, 2003 Ribeiro, Jaime Queirós: “*Reciclagem a Frio com Espuma Betume*”, II Jornadas Técnicas de Pavimentos Rodoviários – Reciclagem de Pavimentos, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2003.
- Rodrigues, 2005 Rodrigues, Zéfiro: “*Betume Modificado com Borracha (BMB) Especificação para Caderno de Encargos*” - Jornadas de Normalização, EP – Estradas de Portugal, E.P.E., Almada, 2005.
- Roma, 2005 Roma, Luís Filipe: “*Revestimentos Superficiais*”, Curso – Conservação de Estradas: Noções Gerais e Controlo de Qualidade de Obra, EP – Estradas de Portugal, E.P.E., Almada, 2005.
- Sabita, 1997 Sabita Manual: “*Technical Guidelines for the Specification and Design of Bitumen-Rubber Asphalt Wearing Courses, Manual 19*”, Southern African Bitumen and Tar Association, África do Sul, 1997.
- Salter e Mat, 1990 Salter, R. J.; Mat, J.: “*Some Effects of Rubber Additives on Asphalt Mixes*”, Washington, 1990.
- Simões e Paul, 2002 Simões, R.; Paul, I.: “*Aplicação da Técnica de Reciclagem de Pavimentos in situ na Beneficiação da E.N.383 - Canhestros/Aljustrel*”, 2º Congresso Rodoviário Português “Estrada 2002”, LNEC, Lisboa, 2002.
- Seixas, 2005 Seixas, Pedro: “*Betume Modificado com Borracha: Vantagens Técnicas*”, Jornadas de Normalização, EP – Estradas de Portugal, E.P.E., Almada, 2005.
- Simões e Paul, 2003 Simões, Rui e Paul, Isabel: “*Aplicação da Técnica de Reciclagem de Pavimentos In Situ com Cimento, na Beneficiação da EN 358 – Canhestros/Aljustrel*”, II Jornadas Técnicas de Pavimentos Rodoviários – Reciclagem de Pavimentos, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2003.
- Soto e Victoria, 2005 Soto, José A. E Victória, Maria del Mar Colás: “*Empleo de Caucho Procedente de NFU’s em Carreteras. Betunes Modificados Estables al almacenamiento*”, IV Jornadas Luso-Brasileiras de pavimentos – Pavimentos Sustentáveis, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2005.
- S&P, 2005 S&P – Clever Reinforcement Company: “*Grelhas “Pré-betuminadas” para Reforço de Pavimentos Asfálticos*”, Curso – Conservação de Estradas: Noções Gerais e Controlo de Qualidade de Obra, EP – Estradas de Portugal, E.P.E., Almada, 2005.
- Stephens, 1982 Stephens, j. E. : “*Fiekd Evaluation of Rubber- Modified Bituminous Concrete*”,

- Washington, 1982.
- Takallou e Hicks, 1988 Takallou, H. B. e Hicks, R. G.: *Development of improved mix and Construction Guidelines for Rubber- Modified Asphalt Pavements*", Washington, 1988.
- Takallov e Saiton, 1992 Takallou, H. B. e Saiton, A.: *Advances in Technology of Asphalt Paving Materials Containing used Tire Rubber*", Washington, 1992.
- Teachingideas, 2005 Teachingideas. Disponível em <http://www.teachingideas-co.uk/history/romanrd.htm>
- Terrel *et al.*, 1997 Terry, R.L.; EPPS, J.A.; Sorenson, J.B.: *Hot-in-Place Recycling State of Practice*", Proceedings Association of Asphalt Paving Technologists – AAPT, 1997.
- Tunes , 1998 Tunes, S.: *“Um fim para os restos da Indústria”*, Revista Globo Ciência, Edição Globo, Ano 8, Número 85, São Paulo, 1998.
- Vicente, 2002 Vicente, Ana Margarida M.: *“Degradação de Pavimentos Flexíveis e Rígidos”*, Disciplina do Mestrado em Vias de Comunicação - Seminário, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2002.
- Vieira, 2003 Vieira, Luís: *“Pavimentação – Reciclagem “Semi quente” em Central”*, II Jornadas Técnicas de Pavimentos Rodoviários – Reciclagem de Pavimentos, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2003.
- Vieira, 2005 Vieira, Luís: *“Utilização de Borracha Procedente de NFU's na Modificação de Betumes de Pavimentação”*, Jornadas de Normalização, EP – Estradas de Portugal, E.P.E., Almada, 2005.
- Watson, 1989 Watson, J.: *“Highway Construction & Maintenance”*, 1989.
- Wikipedia, 2005 Wikipedia. Disponível em <http://en.wikipedia.org/wiki/romanroad>

ANEXOS

ANEXO 1

ANEXO 2

CAROTES REALIZADOS NA E.N. 119

Carote 1		
		
<p>Localização: Km 24+500; Lado esquerdo</p>		
<p>Constituição:</p> <p>Betão Betuminoso = 3,5 cm</p> <p>Mistura Betuminosa Densa = 5 cm</p> <p>Macadame Betuminoso = 6 cm</p> <p>Revestimento Superficial = 3,5 cm (2 camadas)*</p> <p>Semi-Penetração = Sem espessura</p> <p>Altura média da carote = 18,5 cm</p>	<p>Nota: Como apresenta uma das camadas muito reduzida, deduz-se que tenha sido uma recarga para tapagem de alguma cova. Esta carote foi retirada de uma zona em que a camada de desgaste apresentava um envelhecimento do betão betuminoso e podiam-se observar fendas transversais e longitudinais.</p>	
Carote 2		
		
<p>Localização: Km 26+500; Lado direito</p>		
<p>Constituição:</p> <p>Betão Betuminoso = 5 cm</p> <p>Mistura Betuminosa Densa = 6 cm</p> <p>Macadame Betuminoso = 3,5 cm</p> <p>Semi-Penetração = Sem espessura</p> <p>Altura média da carote = 17,5 cm</p>	<p>Nota: A camada de mistura betuminosa densa e a de macadame betuminoso apresentam zonas de vazios, como se pode observar nas fotografias. Pode-se ainda observar que a granulometria de ambas as camadas é muito pequena.</p> <p>O pavimento na zona onde foi retirado a carote, apresentava alguma fendilhação (pele de crocodilo).</p>	

Carote 3



Localização: Km 28+500; Lado esquerdo

Constituição:

Betão Betuminoso = 4 cm

Mistura Betuminosa Densa = 6,8 cm

Macadame Betuminoso = 5 cm

Revestimento Duplo = 2 cm

Semi-Penetração = Sem espessura

Altura média da carote = 23 cm

Nota: O pavimento na zona onde foi retirado a carote, apresentava alguma fendilhação

Carote 4



Localização: Km 30+500; Lado direito

Constituição:

Betão Betuminoso = 4 cm

Mistura Betuminosa Densa = 7,5 cm

Macadame Betuminoso = 6,5 cm

Semi-Penetração = Sem espessura

Altura média da carote = 18 cm

Nota: O pavimento na zona onde foi retirado a carote, apresentava alguma fendilhação

Carote 5



Localização: Km 32+500; Lado esquerdo

Constituição:

Betão Betuminoso = 3 cm

Mistura Betuminosa Densa = 4 cm

Macadame Betuminoso = 5 cm

Pré-Regularização = 4 cm

Semi-Penetração = Sem espessura

Altura média da carote = 19 cm

Nota: O local, onde foi retirado a carote, estava altamente fendilhado. Nessa zona a estrada assenta sobre um aterro ladeado por valas de ambos os lados. Essas valas, pelo que se observou, não têm escoamento, permitindo assim que a água fique estagnada. A água com o passar do tempo infiltra-se no aterro, o qual sofre alterações físicas, prejudicando consequentemente a estrada.

A reabilitação desta zona, passa por resolver o problema do escoamento das águas e dever-se-á prever a colocação de geotêxtil ou geogrelha para retardar futuros problemas de fendilhação futura.

Carote 6



Localização: Km 34+500; Lado direito

Costituição:

Betão Betuminoso = 4 cm

Mistura Betuminosa Densa = 7 cm

Macadame Betuminoso = 8 cm

Tout-Venant = Sem espessura

Altura média da carote = 22 cm

Nota: Suspeita-se que este carote tenha sido retirado de uma zona de saneamento ou de alargamento, pois existe tout-venant na base da carote.

A zona da carote apresentava-se bastante fendilhada, aparecendo a patologia pele de crocodilo.

Carote 7



Localização: Km 36+500; Lado esquerdo

Constituição:

Betão Betuminoso = 4 cm

Mistura Betuminosa Densa = 4,5 cm

Macadame Betuminoso = 9 cm*

Altura média da carote = 18 cm

Nota: A camada de macadame apresenta agregados muito pequenos, surgindo de quando em quando agregados de dimensão maior, o que leva a deduzir que possa ser um revestimento superficial duplo.

A carote partiu na zona de ligação entre o mistura betuminosa densa e a camada subjacente, como se pode observar nas fotografias.

A carote foi retirado de uma zona de aterro. A superfície do pavimento apresentava muita fendilhação. Dever-se-á prever, também para esta zona, reforço com geotêxtil ou geogrelha.

Carote 8



Localização: Km 38+500; Lado direito

Costituição:

Betão Betuminoso = 3,5 cm

Mistura Betuminosa Densa = 4,5 cm

Macadame Betuminoso = 7 cm

Tout-Venant = Sem espessura

Altura média da carote = 15 cm

Nota: Na carote observam-se várias zonas com bastantes vazios. O aparecimento desses vazios, em princípio, devem-se a uma falta de compactação, ou de uma deficiente compactação e/ou à execução da compactação sem recorrer ao cilindro de pneus.

É ainda de referir, que na base da carote encontrou-se tout-venant, logo, deduz-se que a carote foi retirado de uma zona de saneamento ou de alargamento.

A zona que envolvia a carote, apresentava alguma fendilhação.

Carote 9



Localização: Km 40+500; Lado esquerdo

Constituição:

Betão Betuminoso = 4 cm

Macadame Betuminoso = 8,5 cm

Semi-Penetração = Sem espessura*

Altura média da carote = 17,5 cm

Nota: A semi-penetração detectada neste carote, tem uma característica interessante, tendo em conta o local da obra. A semi-penetração foi realizada recorrendo a agregado de granito. A zona que envolvia a carote, apresentava muita fendilhação.

Carote 10



Localização: Km 42+500; Lado direito

Costituição:

Betão Betuminoso = 4,5 cm

Mistura Betuminosa Densa = 5,5 cm

Macadame Betuminoso = 6,5 / 7 cm

Altura média da carote = 17 cm

Nota: A camada de desgaste em betão betuminoso desprendeu-se da camada de regularização em mistura betuminosa densa. Esse desprendimento pode ter sucedido devido à falta de rega de colagem.

O local de onde a carote foi retirado, podiam observar algumas fendas, sem grande ênfase.

Carote 11



Localização: Km 44+500; Lado esquerdo

Constituição:

Betão Betuminoso = 4 cm

Mistura Betuminosa Densa = 6 cm

Macadame Betuminoso = 9 cm

Altura média da carote = 20 cm

Nota: A zona de onde a carote foi retirado, apresentava pouca fendilhação.

Carote 12



Localização: Km 46+500; Lado direito

Costituição:

Betão Betuminoso = 4 cm

Macadame Betuminoso = 8 cm

Tout-Venant = Sem espessura*

Altura média da carote = 12 cm

Nota: A Semi-Penetração detectada neste carote, tem uma característica interessante, tendo em conta o local da obra. A Semi-Penetração foi realizada recorrendo a agregado de granito.

Esta carote foi retirado de um aterro realizado recentemente. É de referir, que o pavimento neste aterro apresenta muitas patologias desde fendas longitudinais, fendas transversais, pele de crocodilo, desprendimento de agregados da camada de desgaste, etc..

Após a apreciação da carote, observa-se que as camadas betuminosas têm pouca espessura. Pelo que se deduz que a estrutura do pavimento não tem capacidade resistente para suportar o tráfego que circula na E.N.119.

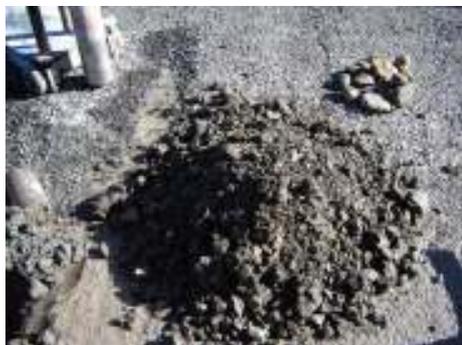
ANEXO 3

POÇOS DE SONDAGEM NA E.N. 119

Poço 1	
Localização: Km 29+600	
	
	
	
Nota: Este poço foi realizado, no sentido Infantado/Coruche, ao km 29+600. As camadas constituintes deste poço resumem-se em: 1- Misturas Betuminosas – 20 cm 2- Agregado britado de granulometria extensa – 37 cm	

Poço 2

Localização: Km 45+700



Nota:

Este poço foi realizado, no sentido Coruche/ Infantado, ao km 45+700.

As camadas constituintes deste poço resumem-se em:

- 1- Misturas Betuminosas – 20 cm
- 2- Agregado britado de granulometria extensa – 44 cm

ANEXO 4

ENSAIOS LABORATORIAIS – SOLO 1 – KM 29+600

ENSAIOS LABORATORIAIS – SOLO 2 – KM 45+700
