



**Fábio Alexandre
Lima da Silva**

**Reabilitação de Pavimentos Rodoviários em
Ambiente Urbano**



**Fábio Alexandre
Lima da Silva**

**Reabilitação de Pavimentos Rodoviários em
Ambiente Urbano**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, realizada sob a orientação científica do Doutor Agostinho António Rocha Correia e Almeida da Benta, Professor auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro.

o júri

presidente

Professora Doutora Ana Luísa Pinheiro Lomelino Velosa
Professora Associada do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

Professora Doutora Rosa Paula da Conceição Luzia
Professora Adjunta do Instituto Politécnico de Castelo Branco

Professor Doutor Agostinho António Rocha Correia e Almeida da Benta
Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

agradecimentos

Deixo uma palavra de apreço e gratidão:

Ao meu Orientador, Professor Doutor Agostinho Benta, pela sua disponibilidade, persistência, incentivo e ensinamentos prestados, bem como pela sua sempre boa disposição e amizade demonstrada durante o desenvolvimento deste trabalho.

À Engenheira Maria do Carlos pela sua disponibilidade, apoio e sugestões prestadas durante o desenrolar do trabalho.

Ao Senhor Vítor Rodrigues pela sua ajuda e companheirismo na realização da campanha de ensaios.

Ao Luís Silva e ao Luís Barbosa pela ajuda, apoio, sugestões e ensinamentos prestados.

Ao Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro pelas condições disponibilizadas.

À Câmara Municipal de Aveiro pelo apoio prestado, em particular ao Engenheiro João Pontes pela sua disponibilidade.

Ao meu amigo, Paulo Ferreira, que formou dupla comigo neste desafio e foi uma mais valia, sempre disponível para ajudar e apoiar.

A todos os meus amigos que me apoiaram ao longo deste percurso académico, em particular o Sebastião Ribeiro, o Rodrigo Carvalho e a Rita Costa.

Por último, aos meus pais por me possibilitarem a realização deste trajeto.

palavras-chave

Reabilitação de pavimentos rodoviários, pavimento flexível, reforço, reconstrução, módulo de deformabilidade, misturas betuminosas

resumo

Portugal possui uma extensa rede de infraestruturas rodoviárias que permitem o desenvolvimento socioeconómico do país. Atualmente os investimentos que recaem nestas infraestruturas servem para a conservação e principalmente para a reabilitação dos pavimentos rodoviários.

O presente trabalho consiste num projeto de reabilitação de um troço de um pavimento rodoviário urbano da cidade de Aveiro.

Numa primeira fase realizou-se uma avaliação da qualidade do pavimento através da realização de uma detalhada inspeção visual e da execução de sondagens, que permitiram conhecer as espessuras das camadas do pavimento assim como determinar em laboratório as diversas características dos materiais. Numa segunda fase procedeu-se ao dimensionamento de soluções que tiveram em conta fatores económicos, ambientais e as condicionantes específicas do ambiente urbano.

Assim os objetivos deste trabalho são: i) avaliar o estado superficial e estrutural do pavimento rodoviário; ii) Determinar as soluções construtivas de reabilitação de pavimentos rodoviários; iii) descrição e discussão da solução adotada.

A realização de todo este projeto é exhaustivamente descrita, as soluções apresentadas são minuciosamente discutidas e comparadas com a solução adotada pelo dono de obra.

O trabalho permitiu dar a conhecer e compreender todo o processo de um projeto de reabilitação de pavimentos rodoviários, particularmente em ambiente urbano, bem como fazer o acompanhamento da construção e do respetivo controlo de qualidade.

keywords

Rehabilitation of the road pavements, flexible pavement, reinforcement, reconstruction, deformation modulus, bituminous mixtures

abstract

Portugal has an extensively network of road infrastructures that allowed the socio-economic development of the country. Actually the investment reflected in these infrastructures aims the conservation and mainly the rehabilitation of road pavements.

The work behind this project of consists in the rehabilitation of a section of an urban road pavement at Aveiro city.

In first place it was performed an evaluation of the pavement quality by carrying out a detailed visual inspection and a deep execution of probes, allowing to know the thickness of the pavement layers. It also allowed, in a laboratory environment, how to determine the various characteristics of the materials.

The second step involved the design of solutions that take into account economic and environmental factors, as well as the specific constraints of the urban environment.

In short, the objectives of this work are: i) Assess the conditions of the surface and structural road pavement; ii) Find out the constructive solutions of road pavement rehabilitation; iii) Description and discussion of the solution adopted. The realization of all this project is thoroughly described and the presented solutions are carefully discussed as well as compared with the solution adopted by the project owner.

This work allowed me to know and to understand the whole process of the rehabilitation of road pavements, particularly in the urban environment, as well as how to do the accompaniment of the construction and the respective quality control.

Índice Geral

Índice Geral	i
Índice de Figuras	v
Índice de Tabelas	ix
Simbologia	xi
Abreviaturas	xiii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Enquadramento	1
1.2. Objetivos	2
1.3. Estrutura da Dissertação	3
Pavimentos Rodoviários	4
1.3.1. Pavimentos Flexíveis	5
2. PATOLOGIA DOS PAVIMENTOS FLEXÍVEIS	9
2.1. Deformações	10
2.2. Fendilhamento	12
2.3. Desagregação da Camada de Desgaste	15
2.4. Movimentos de Materiais	18
2.5. Reparações	19
3. AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DOS PAVIMENTOS FLEXÍVEIS	21
3.1. Avaliação do Estado Superficial do Pavimento	21
3.1.1. Índice de Qualidade	24
3.2. Avaliação da Capacidade Estrutural do Pavimento	25
3.3. Avaliação da Constituição do Pavimento	27
4. CONSERVAÇÃO E REABILITAÇÃO DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS	31
4.1. Introdução	31
4.2. Técnicas de Conservação e Reabilitação de Pavimentos	32
4.3. Fatores de Dimensionamento de Pavimentos Rodoviários	33
4.3.1. Tráfego	34
4.3.2. Temperatura de Serviço	37
4.3.3. Fundação dos Pavimentos	39
4.3.4. Materiais Granulares	40
4.3.5. Materiais Betuminosos	40
4.3.5.1. Características do Betume	41
4.3.5.2. Características Volumétricas das Misturas Betuminosas	42
4.3.5.3. Cálculo dos Módulos de Deformabilidade das Misturas Betuminosas	44
4.4. Critérios de Ruína de Pavimentos Flexíveis	45
4.5. Critérios de Ruína para Misturas com Ligante Hidráulico	46
4.6. Dimensionamento do Reforço de Pavimentos Rodoviários Flexíveis	47
4.6.1. Procedimento Baseado nas Espessuras Efetivas	48
4.6.2. Pré-dimensionamento do Reforço através do MACOPAV	51

4.6.3.	Método Empírico-mecanicista	52
4.6.3.1.	Modelo de Cálculo de Tensões e Extensões.....	52
5.	TÉCNICAS DE CONSERVAÇÃO E REABILITAÇÃO DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS	55
5.1.	<i>Introdução</i>	<i>55</i>
5.2.	<i>Técnicas de Reabilitação das Características Superficiais</i>	<i>56</i>
5.3.	<i>Misturas Betuminosas Convencionais a Quente.....</i>	<i>59</i>
5.3.1.	Misturas Betuminosas a Quente.....	59
5.3.2.	Misturas Betuminosas de Alto Módulo	61
5.4.	<i>Misturas Betuminosas com Betumes Modificados</i>	<i>62</i>
5.4.1.	Misturas Betuminosas com Betume Modificado com Polímeros	63
5.4.2.	Misturas Betuminosas com Betume Modificado com Borracha	65
5.4.3.	Misturas Betuminosas com Borracha	67
5.5.	<i>Misturas Betuminosas Recicladadas.....</i>	<i>67</i>
5.5.1.	Considerações Iniciais	67
5.5.2.	Técnicas de Reciclagem a Frio <i>in situ</i>	69
5.5.2.1.	Reciclagem a Frio <i>in situ</i> , com Cimento.....	70
5.5.2.2.	Reciclagem a Frio <i>in situ</i> , com Emulsão Betuminosa	72
5.5.2.3.	Reciclagem a Frio <i>in situ</i> , com Betume-espuma.....	75
5.5.3.	Técnicas de Reciclagem a Quente <i>in situ</i>	76
5.5.4.	Técnicas de Reciclagem a Frio em Central	78
5.5.5.	Técnicas de Reciclagem a Quente em Central	78
5.6.	<i>Técnicas de Anti-reflexão de Fendas.....</i>	<i>79</i>
5.7.	<i>Materiais Tratados com Ligantes Hidráulicos</i>	<i>83</i>
5.8.	<i>Controlo de Qualidade.....</i>	<i>84</i>
5.9.	<i>Condicionantes na Reabilitação de Pavimentos Rodoviários em Ambiente Urbano</i>	<i>85</i>
6.	CASO DE ESTUDO	87
6.1.	<i>Enquadramento.....</i>	<i>87</i>
6.2.	<i>Avaliação do Estado Superficial do Pavimento.....</i>	<i>90</i>
6.3.	<i>Avaliação da Constituição do Pavimento</i>	<i>92</i>
6.4.	ENSAIOS LABORATORIAIS	97
6.4.1.	Solo de Fundação.....	97
6.4.1.1.	Teor de Humidade <i>in situ</i>	97
6.4.1.2.	Análise Granulométrica	97
6.4.1.3.	Limites de Consistência	99
6.4.1.4.	Proctor Modificado	100
6.4.1.5.	Ensaio de CBR (<i>California Bearing Ratio</i>)	101
6.4.2.	Camadas Granulares	102
6.4.2.1.	Equivalente de Areia	102
6.4.3.	Misturas Betuminosas	103
6.4.3.1.	Baridade Aparente	103
6.4.3.2.	Baridade Máxima Teórica.....	103
6.4.3.3.	Teor em Betume.....	104
6.4.3.4.	Análise Granulométrica	105
6.5.	<i>Caracterização das Ações</i>	<i>106</i>
6.5.1.	Tráfego.....	106
6.6.	<i>Dimensionamento do Reforço</i>	<i>107</i>
6.6.1.	Pré-Dimensionamento Através do Método das Espessuras Efetivas	108
6.6.2.	Pré-Dimensionamento Através do MACOPAV	108

6.6.3.	Dimensionamento Empírico-mecanicista da Shell	109
6.6.3.1.	Avaliação da Estrutura Existente.....	109
6.6.3.2.	Soluções para a Reconstrução	110
6.7.	<i>Solução Adotada pelo Dono de Obra</i>	115
6.7.1.	Procedimento da Realização da Obra.....	115
6.7.2.	Verificação da Solução Adotada	118
6.8.	<i>Controlo de Qualidade da Mistura Betuminosa Adotada</i>	118
7.	CONSIDERAÇÕES FINAIS E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	120
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	125

Índice de Figuras

Figura 1: Distribuição de tensões verticais na fundação de um pavimento rodoviário (PTC, 2005).....	5
Figura 2: Estrutura de um pavimento rodoviário flexível (CAeMD, 2012)	7
Figura 3: Esquema do comportamento de um pavimento flexível (Minhoto, 2005).....	7
Figura 4: Famílias e tipos de degradações (Benta, 2012).....	10
Figura 5: Deformação localizada (Benta, 2012).....	11
Figura 6: Ondulação (LNEC, 2005)	11
Figura 7: Rodeira presente na Avenida da Universidade (fotografia de autor)	11
Figura 8: Esquema de como determinar a profundidade de uma rodeira e de uma deformação localizada (Estradas de Portugal, 2008).....	11
Figura 9: Fenda isolada presente na Avenida da Universidade (fotografia de autor)	13
Figura 10: Fenda ramificada presente na Avenida da Universidade (fotografia de autor)	13
Figura 11: Pele de crocodilo de malha estreita presente na Avenida da Universidade (fotografia de autor) ...	14
Figura 12: Pele de crocodilo de malha larga presente na Avenida da Universidade (fotografia de autor)	14
Figura 13: Tipos de desagregações e de polimentos da camada de desgaste (Estradas de Portugal, 2008)	16
Figura 14: Desagregação superficial e polimento dos agregados na Avenida da Universidade (fotografias de autor)	16
Figura 15: Pelada existente na Avenida da Universidade (fotografias de autor).....	17
Figura 16: Ninho existente na Avenida da Universidade (fotografias de autor).....	17
Figura 17: Exsudação (Estradas de Portugal, 2008)	18
Figura 18: Diversos tipos de reparações visíveis na Avenida da Universidade (fotografias de autor)	19
Figura 19: GERPHO (Pereira & Miranda, 1999)	23
Figura 20: Indicação qualitativa dos intervalos do Índice de Qualidade	24
Figura 21: Representação da bacia de deflexões e a influência das camadas de um pavimento flexível (Fontul, 2004).....	26
Figura 22: Execução de sondagens à rotação e carote extraído do pavimento em estudo da Avenida da Universidade (fotografias de autor)	27
Figura 23: Poço realizado na Avenida da Universidade (fotografia de autor).....	28
Figura 24: Princípio de funcionamento do Radar de Prospeção em pavimento flexível (Fontul, 2004)	29
Figura 25: Evolução do estado de um pavimento ao longo do tempo (Batista, 2004).....	32
Figura 26: Esquema adotado para a secção de um eixo-padrão sobre um pavimento (Branco <i>et al.</i> , 2006)	35

Figura 27: Temperatura de serviço de camadas betuminosas (SHELL, 1977)	38
Figura 28: Ábaco da <i>Asphalt Institute</i> para o cálculo da espessura de um pavimento só constituído por camadas de betão betuminoso (Branco <i>et al.</i> , 2006)	51
Figura 29: Fases do método baseado nas espessuras efetivas	51
Figura 30: Espessura do pré-dimensionamento para o pavimento flexível com classe de fundação F ₃ (EP-JAE, 1995)	52
Figura 31: Os revestimentos betuminosos superficiais (Vicente, 2006)	58
Figura 32: Esquema ilustrativo das diferenças entre as misturas betuminosas a quente tradicionais e as misturas betuminosas de alto módulo (Batista, 2005)	62
Figura 33: Procedimento da reciclagem a frio <i>in situ</i> com cimento (traduzido e adaptado de Wirtgen, 2001)	71
Figura 34: Procedimento da reciclagem a frio <i>in situ</i> com emulsão betuminosa (traduzido e adaptado de Wirtgen, 2001)	73
Figura 35: Processo de obtenção do betume espuma (traduzido e adaptado de Wirtgen, 2001)	75
Figura 36: Procedimento da reciclagem a frio <i>in situ</i> com betume-espuma (Wirtgen, 2012)	76
Figura 37: Central móvel para reciclagem de misturas betuminosas (David, 2006)	78
Figura 38: Esquema do processo de reciclagem a quente em central (Baptista, 2006)	79
Figura 39: Mecanismo de propagação de fendas e respetivo sistema anti-reflexão de fendas (Batista, 2005)	81
Figura 40: Aspeto de uma grelha (Retirado de Huenker, 2009)	82
Figura 41: Exemplo de colocação da malha de aço (Retirado de Geofoco, 2013)	82
Figura 42: Aplicação do geotêxtil sobre a rega betuminosa (Batista, 2005)	83
Figura 43: Localização e visualização do troço de estudo da Avenida da Universidade (Retirado de Google Earth, 2013)	87
Figura 44: Divisão da Avenida da Universidade em troços de estudo e localização e designação das prospeções realizadas	88
Figura 45: Conjunto de fotografias que ilustram o panorama geral do troço em estudo da Avenida da Universidade (fotografias de autor)	88
Figura 46: Perfil transversal simplificado da Avenida da Universidade	89
Figura 47: Fotografias do troço em estudo da Universidade de Aveiro captadas durante o Inverno (fotografias de autor)	90
Figura 48: Localização do Poço de Prospeção e do Carote	92
Figura 49: Sequência da realização do poço de prospeção (fotografias de autor)	93
Figura 50: Carote extraído no sentido Sul-Norte da Avenida da Universidade (fotografias de autor)	93

Figura 51: Fotografias dos carotes extraídos (fotografias de autor)	95
Figura 52: Estrutura observada através da realização do poço de prospeção	95
Figura 53: Estrutura observada através da realização do carote E.....	95
Figura 54: Fotografias do aspeto da camada granular (fotografias de autor)	96
Figura 55: Fotografias alusivas ao solo de fundação (fotografias de autor)	96
Figura 56: Curva granulométrica do solo de fundação	98
Figura 57: Série de peneiros ASTM e aspeto do solo após a peneiração (fotografias de autor).....	98
Figura 58: Gráfico para a obtenção do LL.....	99
Figura 59: Procedimento do ensaio Proctor (fotografias de autor)	101
Figura 60: Procedimento do ensaio de CBR (fotografias de autor).....	101
Figura 61: Ensaio de equivalente de areia (fotografia de autor)	102
Figura 62: Procedimento do ensaio de baridade máxima teórica (fotografias de autor).....	104
Figura 63: Procedimento da extração do betume (fotografias de autor)	104
Figura 64: Enquadramento da curva granulométrica da mistura E e F no fuso granulométrico do Caderno de Encargos (Estradas de Portugal, 2012).....	106
Figura 65: Distribuição do tráfego médio diário anual referente ao ano de 2008 (Relatório fornecido pela CMA, 2008)	107
Figura 66: Estrutura tipo do troço (EP-JAE, 1995)	107
Figura 67: Estrutura com microaglomerado betuminoso a frio em camada de desgaste	112
Figura 68: Realização da escavação do troço em estudo (fotografias de autor)	115
Figura 69: Aplicação do geotêxtil e colocação da primeira camada de ABGE (fotografias de autor)	116
Figura 70: Colocação, espalhamento e aspeto final da segunda camada de ABGE (fotografias de autor).....	116
Figura 71: Rega de impregnação em betume fluidificado (fotografias de autor)	117
Figura 72: Aspeto após a colocação da mistura betuminosa densa (fotografia de autor)	117
Figura 73: Aspeto após a aplicação do betão betuminoso (fotografias de autor)	117
Figura 74: Solução aplicada na reconstrução do troço	118

Índice de Tabelas

Tabela 1: Quantificação do IRI, na ausência de medição direta (Picado-Santos <i>et al.</i> , 2006).....	25
Tabela 2: Valores representativos dos módulos de deformabilidade e dos coeficientes de <i>Poisson</i> de vários materiais usados nos pavimentos rodoviários (Domingos, 2007; EP-JAE, 1995).....	34
Tabela 3: Valores de “L”, “r” e “p” pelo método da Shell	35
Tabela 4: Classes de tráfego, taxa de crescimento anual, fator de agressividade e número de eixo-padrão de 80kN para pavimentos flexíveis (EP-JAE, 1995).....	36
Tabela 5: Classes de tráfego definidas pelo número de pesados acumulados em 20 anos (Branco <i>et al.</i> , 2006) ..	37
Tabela 6: Classes de fundação (EP-JAE, 1995)	39
Tabela 7: Fator de conversão C (Branco <i>et al.</i> , 2006)	50
Tabela 8: Designação das misturas betuminosas (Estradas de Portugal, 2012).....	60
Tabela 9: Características das misturas a quente (Santos, 2009)	60
Tabela 10: Características das misturas MBR-BMB e MBA-BMB (Antunes <i>et al.</i> , 2006)	66
Tabela 11: Principais técnicas de reciclagem (Santos, 2009)	69
Tabela 12: Requisitos/propriedades do material fresado (Estradas de Portugal, 2012).....	71
Tabela 13: Requisitos mínimos para a mistura reciclada com emulsão	74
Tabela 14: Fusos granulométricos para o material betuminoso recuperado	74
Tabela 15: Índice de qualidade no Sentido Norte-Sul	91
Tabela 16: Índice de qualidade no Sentido Sul-Norte	91
Tabela 17: Características geométricas das camadas betuminosas de desgaste (betão betuminoso) e da camada de regularização (mistura betuminosa densa).....	94
Tabela 18: Teor de Humidade do solo de fundação <i>in situ</i>	97
Tabela 19: Resultados da análise granulométrica do solo de fundação	98
Tabela 20: Valores do teor de humidade e de penetração de 4 amostras de solo da fundação	99
Tabela 21: Determinação do Limite de Plasticidade	100
Tabela 22: Resultados experimentais da baridade dos provetes	103
Tabela 23: Resultados experimentais da baridade máxima teórica	104
Tabela 24: Teor de betume por localização e camada	105
Tabela 25: Análise granulométrica da mistura de desgaste da zona E e F	105
Tabela 26: Módulo de deformabilidade da camada granular e semipenetração	109
Tabela 27: Peso volúmico do betume e do agregado e porosidade da camada de desgaste	110

Tabela 28: Peso volúmico do betume e do agregado e porosidade da camada de regularização..... 110

Tabela 29: Valores adotados e respetiva metodologia de previsão dos módulos de deformabilidade..... 111

Simbologia

CBR	California Bearing Ratio
D	Percentagem de dano
E	Módulo de deformabilidade
E_g	Módulo de deformabilidade da camada granular
E_{sf}	Módulo de deformabilidade do solo de fundação
h	Espessura
IPen	Índice de penetração do betume
IQ	Índice de qualidade global
L	Distância
n	Porosidade
N_{80}	Número de eixos-padrão de 80 kN
N_a	Número admissível de eixos-padrão
N_p	Número máximo de eixos-padrão de dimensionamento
p	Pressão de um pneu de um veículo
pen25	Penetração do betume a 25°C
r	Raio
S_b	Módulo de rigidez do betume
T	Temperatura de serviço
t	Taxa de crescimento anual
T0	Espessura da camada de reforço
t_b	Percentagem de betume

Tab	Temperatura de amolecimento do betume
tc	Tempo de carregamento
Te	Espessura efetiva total
Tn	Espessura de pavimento constituído apenas por betão betuminoso necessária para suportar o tráfego considerado
V _b	Percentagem volumétrica de betume
V _a	Percentagem volumétrica de agregado
VMA	Volume de vazios do esqueleto da mistura
vt	Velocidade média do tráfego pesado
v	Coefficiente de <i>Poisson</i>
α	Fator de agressividade
γ _b	Peso específico do betume
γ _a	Peso específico do agregado
ε _t	Extensão de tração
ε _z	Extensão de compressão

Abreviaturas

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
AC	Asphalt concrete
AI	Asphalt Institute
ABGE	Material britado de granulometria extensa
AGEC	Agregado de granulometria extensa com cimento
BB	Betão betuminoso
BBr	Betão betuminoso rugoso
BMB	Betume modificado com borracha
CE	Conformité Européenne
CEEP	Caderno de encargos da Estradas de Portugal
CMA	Câmara Municipal de Aveiro
EA	Equivalente de areia
EN	Estrada Nacional
GERPHO	Groupe d'Examen Routier par PHOtographie
IP	Índice de plasticidade
IRI	International Roughness Index
LL	Limite de liquidez
LP	Limite de plasticidade
LCPC	Laboratoire Central des Ponts et Chaussés
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
MACOPAV	Manual de conceção de pavimentos

mBBr	Micro betão betuminoso rugoso
MB	Macadame betuminoso
MBA	Mistura betuminosa aberta
MBAM	Mistura betuminosa de alto módulo
MBD	Mistura betuminosa densa
MBR	Mistura betuminosa rugosa
NP	Norma Portuguesa
PMB	Betume modificado com polímero
PRN 2000	Plano rodoviário nacional 2000
PRN 85	Plano rodoviário nacional 1985
SAMI	Stress Absorving Membrane Interlayer
TMDA _p	Tráfego médio diário de veículos pesados

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento

Portugal tem uma extensa rede de estradas nacionais construídas no início da década de 90, e neste momento apenas uma pequena percentagem foi sujeita a melhorias, sendo que, as restantes estradas não sofreram qualquer tipo de tratamento. Portanto, a rede nacional necessita urgentemente de ser reabilitada, repondo características que assegurem condições de segurança, conforto e economia.

O plano rodoviário nacional 2000 (PRN 2000) veio inserir algumas inovações e reformular determinados aspetos do plano rodoviário nacional 85 (PRN 85), porém sem prejuízo de terem sido respeitados os grandes objetivos do PRN 85. O PRN 2000 traçou e reclassificou novos percursos, e ainda criou uma nova categoria, as das estradas regionais. Este aumento de estradas, sobretudo em zonas fronteiriças e o melhoramento da acessibilidade de alguns concelhos contribuíram para o desenvolvimento socioeconómico do País (Decreto-Lei nº222/98 de 17 de Julho 1998).

Por outro lado, o aumento da qualidade de vida das populações exige maior segurança e conforto nas estradas, sendo o fator segurança extremamente fulcral nos dias de hoje. Portanto, às redes rodoviárias são cada vez mais exigidas melhores qualidades funcionais e estruturais. Atualmente assiste-se a uma importante modernização da rede rodoviária nacional, face ao progressivo aumento do tráfego, assim como a crescente preocupação com a componente ambiental.

Hoje em dia, as administrações rodoviárias confrontam-se com diversificadas patologias, quer funcionais quer estruturais, procurando soluções eficazes de conservação e reforço, recorrendo aos orçamentos disponíveis. Também se tem verificado a adoção de técnicas que possibilitam uma melhor gestão das matérias-primas, essencialmente a sua reutilização e reciclagem, preservando o ambiente. Para além das técnicas de conservação e reabilitação de pavimentos e os materiais utilizados, é necessário ter em conta outros fatores de extrema importância, o tráfego utente e as condições climatéricas. A análise de todas as componentes serve para minimizar intervenções futuras de conservação e/ou reabilitação (Batista, 2004).

Os pavimentos rodoviários flexíveis são em Portugal a principal opção como solução de pavimentação da rede rodoviária. É um tipo de estrutura que se adapta facilmente ao comportamento da fundação, pois é caracterizado por possuir uma apreciável flexibilidade (Morais, 2011).

A fundação consiste no conjunto de camadas de solo onde está assente o pavimento, incluindo, para além da camada de leito do pavimento, os terrenos subjacentes. A função desta é de suporte do pavimento (CEPSA, 2006).

As vias rodoviárias são infraestruturas que estão permanentemente sujeitas ao efeito das ações climáticas e do tráfego, o que provoca degradações nos pavimentos, levando a que a entidade responsável, através de inspeções visuais e ensaios de campo procurem a origem das anomalias tornando possível reparar toda e qualquer degradação existente nos pavimentos, para que os utentes usufruam e circulem na superfície de rolamento, na maior comodidade e segurança possível.

As degradações dos pavimentos rodoviários surgem ao longo do seu período de vida e reduzem a capacidade estrutural e a aptidão funcional. Para minimizar ou retardar grandes estragos numa primeira fase, aplicam-se técnicas de estabilização/conservação, contudo, e na maioria das vezes, o estado avançado da degradação só permite recorrer a técnicas mais drásticas, como a reabilitação e reconstrução.

As intervenções anteriormente referidas passam por repor as características iniciais ou melhorá-las, nomeadamente as características funcionais, de entre as quais se destacam a regularidade geométrica, a aderência e a capacidade de drenagem de águas superficiais. Hoje em dia, também é dada importância aos aspetos de natureza ambiental, tal como a atenuação do ruído produzido pelos rodados dos veículos e aspetos paisagísticos (Antunes, 2005).

1.2. Objetivos

O trabalho tem como principais objetivos a avaliação do estado de conservação e apresentação de metodologias de reabilitação de pavimentos rodoviários em meio urbano. Numa primeira fase pretende-se estudar as metodologias de avaliação funcional e estrutural dos pavimentos rodoviários e numa segunda fase analisar as metodologias de projeto de reabilitação.

O trabalho centra-se na análise de todo o processo de reabilitação de pavimentos, desde a análise estrutural do existente até à aplicação do reforço final. Enquadrado numa base de informação, inspeção e investigação *in situ*, aliada à determinação de parâmetros em laboratório, para posteriormente se efetuar o dimensionamento do reforço e adotar a melhor abordagem face ao tipo de pavimento em estudo e aos meios geralmente disponíveis.

Para tal, o caso em estudo escolhido para abordar a beneficiação do pavimento é um troço da Avenida da Universidade, arruamento situado na cidade de Aveiro.

1.3. Estrutura da Dissertação

Esta dissertação encontra-se dividida em sete capítulos e diversos subcapítulos. O presente capítulo contém a introdução, que engloba um pequeno enquadramento e os principais objetivos desta dissertação. Inclui uma breve caracterização dos pavimentos rodoviários flexíveis.

No capítulo 2 abordam-se as patologias que podem surgir nos pavimentos rodoviários flexíveis.

No capítulo 3 é feita uma abordagem aos métodos disponíveis de avaliação da qualidade dos pavimentos, nomeadamente o estado superficial e a capacidade estrutural do pavimento. Refere ainda as técnicas que permitem expor a constituição do pavimento.

O capítulo 4 aborda as técnicas disponíveis de reabilitação estrutural. Neste capítulo são mencionados e desenvolvidos alguns métodos de dimensionamento de reforço de pavimentos rodoviários, assim como as etapas precedentes ao cálculo do reforço, nomeadamente os fatores de dimensionamento e os critérios de ruína dos pavimentos rodoviários.

No capítulo 5 apresentam-se as diversas técnicas de reabilitação das características superficiais e os materiais geralmente utilizados na camada de reforço, descrevendo-se os aspetos mais relevantes dos materiais tradicionais e os não tradicionais. São referidas ainda algumas técnicas de anti-reflexão de fendas e, por último, indicam-se alguns materiais tratados com ligantes hidráulicos.

O capítulo 6 aborda o caso de estudo, onde se insere todo o procedimento realizado para a reabilitação da Avenida da Universidade. Indicam-se os resultados da avaliação do estado superficial, da constituição do pavimento e dos ensaios laboratoriais realizados. Neste capítulo são dimensionadas algumas soluções construtivas a aplicar, utilizando materiais tradicionais. É

referido todo o processo construtivo, a solução adotada pelo dono de obra e o respetivo controlo de qualidade.

Por último, no capítulo 7 apresentam-se as principais conclusões e identificam-se possíveis propostas de trabalhos futuros.

Pavimentos Rodoviários

Os pavimentos rodoviários resumem-se a estruturas laminares estratificadas que se apoiam continuamente sobre um solo de fundação, sendo este natural ou de solo selecionado, tendo que suportar as cargas do tráfego e um conjunto de ações durante a vida útil do pavimento, sem interferir com a comodidade e segurança dos utentes (AASHTO, 1986).

As camadas superiores de um pavimento, as camadas ligadas, são constituídas por materiais granulares (britas e areias) estabilizados com ligantes (betuminosos ou hidráulicos), conforme o tipo de pavimento. As camadas subjacentes às camadas ligadas são constituídas por materiais granulares britados ou naturais, geralmente não ligados e compactados por meios mecânicos. As camadas anteriores estão apoiadas na fundação, normalmente constituídas por terreno natural ou por material granular em aterro (Minhoto, 2005).

Na conceção de pavimentos rodoviários é necessário ter em conta dois aspetos fundamentais, o comportamento estrutural, que é dependente da qualidade dos materiais e das espessuras das camadas que constituem o pavimento e respetiva fundação e, por outro lado, as suas exigências funcionais, que asseguram as condições de textura e acabamento da superfície do pavimento. Exige-se dos pavimentos duas qualidades: a qualidade funcional e a qualidade estrutural.

A qualidade funcional está relacionada com as exigências dos utentes (conforto, segurança e economia). A qualidade estrutural está relacionada com a capacidade do pavimento para suportar as cargas dos veículos, sem que este sofra alterações significativas, as quais colocariam em causa a garantia da qualidade funcional (Branco *et al.*, 2006).

O comportamento de um pavimento rodoviário é determinado através de:

- Ação do tráfego (que atua sobre ele);
- Ações climáticas (que incidem sobre ele);

- Pela sua constituição, características dos materiais e espessuras e número de camadas;
- Características da fundação.

Os pavimentos rodoviários estão distribuídos em três classes: flexíveis, rígidos e semirrígidos. Esta distribuição é realizada em função da constituição e do modo de funcionamento, principalmente quanto à forma de distribuição das cargas. Os diferentes tipos de pavimentos rodoviários possuem características mecânicas e geométricas distintas. O comportamento de uma solicitação num pavimento flexível é diferente de num pavimento rígido, ocorrendo a distribuição de tensões conforme demonstra a Figura 1, sendo que nos pavimentos flexíveis as tensões dissipam-se em profundidade, com tensões mais altas e concentradas do que as tensões exercidas nos pavimentos rígidos (Alves, 2007).

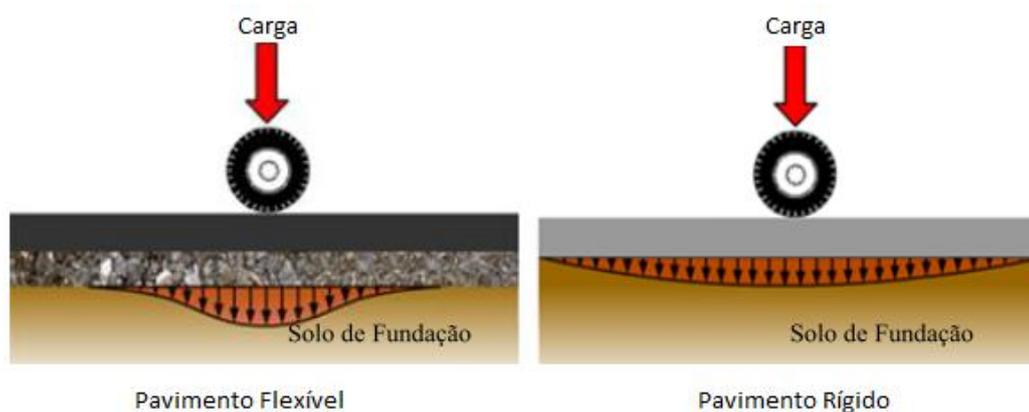


Figura 1: Distribuição de tensões verticais na fundação de um pavimento rodoviário (PTC, 2005)

1.3.1. Pavimentos Flexíveis

Neste trabalho apenas serão detalhadas as características dos pavimentos flexíveis, visto que o objetivo final deste trabalho consiste no reforço de um pavimento flexível.

Entende-se por pavimento flexível uma estrutura rodoviária constituída por misturas betuminosas nas camadas superiores, sendo as camadas subjacentes às betuminosas e sobrejacentes à fundação em material granular. As camadas betuminosas possuem elevada deformabilidade e têm como principal função resistir às tensões de tração. Se as condições de fronteira forem as desejadas, ou seja, as camadas betuminosas estão “coladas” entre si, em que as diversas camadas trabalham como uma só, a tensão máxima de tração verifica-se na base

desse conjunto de camadas. As camadas granulares resistem apenas a tensões de compressão. Por vezes estas camadas são estabilizadas com ligantes hidráulicos, normalmente com cimento Portland, de forma a aumentar as suas características mecânicas (Branco *et al.*, 2006; Minhoto, 2005).

A estrutura destes pavimentos está completamente ligada à fundação, sendo que as cargas descarregadas à superfície são transmitidas à mesma. Este tipo de estrutura depende do imbricamento, do atrito e da coesão dos materiais para a sua estabilidade (O’Flaherty, 1998).

As camadas de um pavimento podem diferenciar-se pelas funções que exercem, tendo a camada de desgaste que assegurar uma boa aderência entre o pavimento e os rodados do veículo. Caso seja uma camada impermeável, tem de cumprir rigorosamente essa função, de modo à humidade não danificar as camadas subjacentes. É constituída por material betuminoso com agregados de alta resistência ao desgaste e possui espessuras na ordem dos 4 a 6 cm.

A camada de regularização deve apresentar uma superfície endireitada, possibilitando assim uma melhor colocação da camada sobrejacente (camada de desgaste). É constituída por material betuminoso, normalmente macadame, envolvendo os respetivos agregados e apresenta espessuras na ordem dos 5 a 12 cm.

A camada de base granular tem como principal função a absorção das tensões transmitidas pelas camadas sobrejacentes, de forma a salvaguardar a capacidade de suporte das mesmas. É normalmente constituída por uma camada na ordem dos 20cm de material britado de granulometria extensa (ABGE).

A camada de sub-base granular possui características drenantes, impedindo a estagnação de águas e mesmo a ascensão da água por capilaridade para camadas superiores. A camada é constituída por material granular do tipo *tout-venant* ou por solos selecionados e apresenta uma espessura na ordem dos 15 a 20cm (EP-JAE, 1995; Branco *et al.*, 2006).

Na Figura 2 está esquematizada uma estrutura de um pavimento flexível com todas as camadas admissíveis, observa-se que um pavimento para além das camadas de desgaste e de regularização (na figura denominada por camada de ligação) poderá apresentar uma outra, a camada de base, aumentando a capacidade estrutural. Caso o solo da fundação não possua as características exigidas, coloca-se uma camada sobre este, denominada por leito do pavimento, com melhores características.

As interfaces das camadas ligadas são sujeitas a regas de colagem com ligantes betuminosos, tornando e possibilitando a estrutura constituída por varias camadas, ser e trabalhar como uma só.

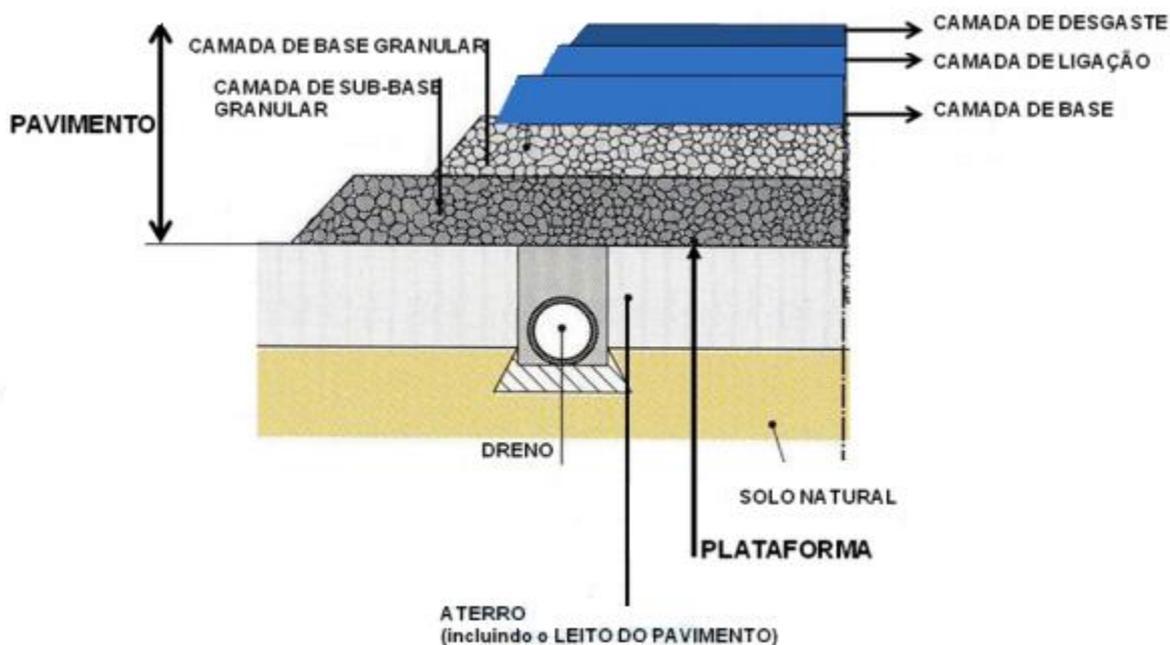


Figura 2: Estrutura de um pavimento rodoviário flexível (CAeMD, 2012)

Estando o pavimento conforme as condições anteriormente mencionadas e, de acordo com o que já foi descrito, o estado de tensão no plano vertical varia de uma tensão de compressão máxima na face superior da camada de desgaste, até um valor máximo de tensão de tração na face inferior da última camada betuminosa. Os esforços de ocorrência crítica são a tensão de tração na face inferior das camadas betuminosas e a tensão de compressão na face inferior das camadas granulares e no topo da fundação, como esquematiza a Figura 3 (Branco *et al.*, 2006).

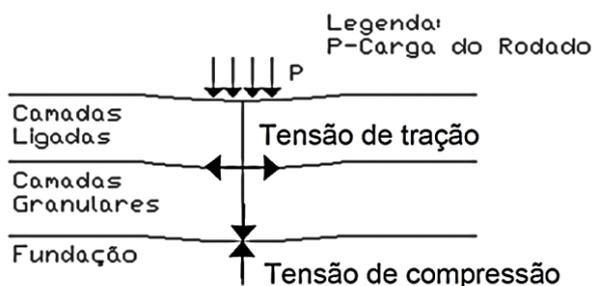


Figura 3: Esquema do comportamento de um pavimento flexível (Minhoto, 2005)

2. PATOLOGIA DOS PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

Os pavimentos rodoviários têm como principal função a de constituir uma superfície livre e desempenhada, garantindo aos utentes condições adequadas de segurança, conforto e economia. Com o tempo estas características fundamentais vão perdendo os níveis de exigência, devido ao desgaste provocado pelas ações transmitidas ao pavimento, surgindo assim as degradações.

Os fatores responsáveis pela decadência das características iniciais agrupam-se em fatores passivos e fatores ativos, sendo que os fatores passivos são referentes às características do pavimento (espessuras das camadas, materiais usados, qualidade de construção) e os ativos (tráfego, agentes climáticos) são os principais responsáveis pela deterioração dos pavimentos (Branco *et al.*, 2006).

O processo de evolução das degradações de um pavimento fundamenta-se no “princípio da cadeia das consequências”, sendo que uma degradação não evolui isoladamente no tempo, estas dão origem a outras degradações iniciando-se uma atividade em cadeia (Pereira & Miranda, 1999).

As patologias são classificadas como sendo do tipo estrutural ou funcional sendo, respetivamente, as degradações responsáveis pela ruína/colapso da estrutura do pavimento e as degradações que causam o desgaste da camada superficial do pavimento, pondo em causa a segurança e comodidade dos utentes.

Na escolha da estratégia de conservação mais eficiente é necessário conhecer bem as degradações mais frequentes nos pavimentos flexíveis rodoviários, assim como as suas causas e origens.

As anomalias oriundas nos pavimentos flexíveis podem ser agrupadas em cinco grandes grupos, de acordo com a Figura 4. Segundo o Catálogo de Degradações elaborado pela Estradas de Portugal as reparações observáveis também se podem considerar como uma patologia, visto que mesmo bem executadas, criam discontinuidades e são zonas mais suscetíveis ao surgimento de novas degradações (EP-JAE, 2006).

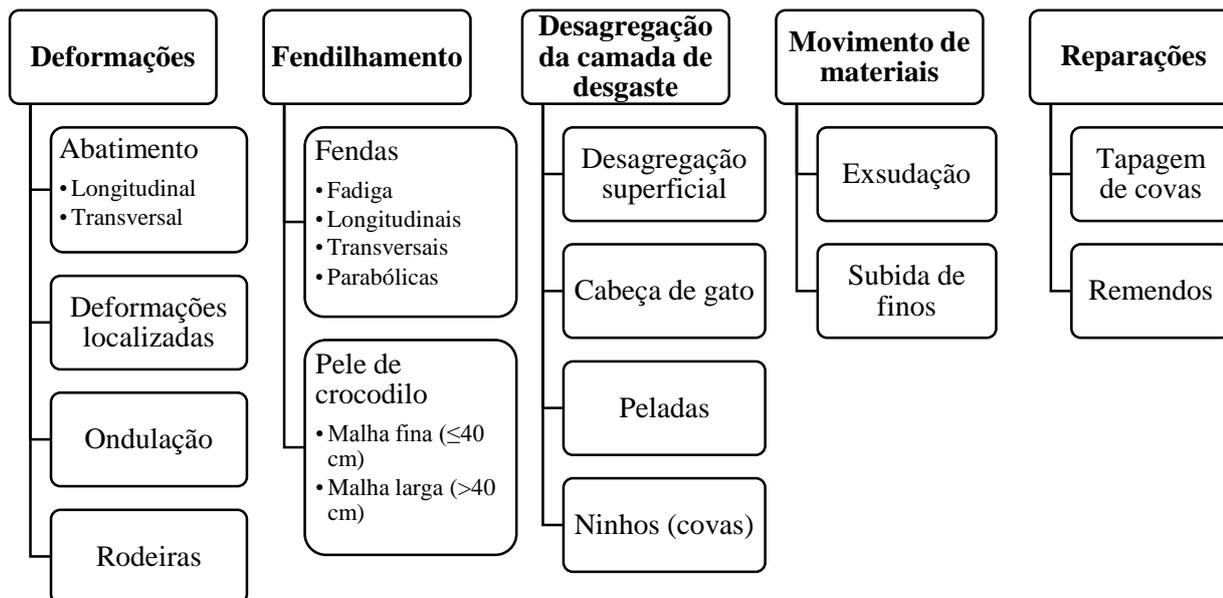


Figura 4: Famílias e tipos de degradações (Benta, 2012)

2.1. Deformações

As deformações estão relacionadas com a capacidade resistente das camadas betuminosas ou com a capacidade estrutural do pavimento. As deformações provocam irregularidades na superfície do pavimento provocando transtorno aos utentes, pondo em causa as condições de circulação (Antunes, 2005).

O abatimento é uma deformação que normalmente apresenta uma extensão significativa, podendo ocorrer transversal ou longitudinalmente ao pavimento. Quando ocorre longitudinalmente pode surgir junto da berma ou na faixa de rodagem. O aparecimento desta degradação deve-se essencialmente à débil capacidade de suporte das camadas granulares e do solo de fundação, devido sobretudo à qualidade dos materiais e à entrada de água.

As deformações localizadas (Figura 5) surgem devido à fraca capacidade de suporte das camadas granulares e/ou solo de fundação em zonas pontuais do pavimento. Existe também a possibilidade de contaminação localizada das camadas granulares, contribuindo para o aparecimento de uma deformação pontual. As deformações localizadas surgem em forma de depressão, de forma arredondada, alterando a regularidade do pavimento.

As ondulações são deformações que ocorrem transversalmente e que se repetem com determinada frequência ao longo do pavimento, conforme a Figura 6. Normalmente ocorrem

quando a camada de desgaste é constituída por um revestimento superficial. Devido à má execução construtiva e/ou deficiente distribuição do ligante ou pode-se verificar também em camadas de betão betuminoso, em que ocorra arrastamento da mistura por excessiva deformação plástica, devido à ação do tráfego. Pode também ter como causa a deformação da fundação, transmitindo esses assentamentos às camadas superficiais.



Figura 5: Deformação localizada (Benta, 2012)



Figura 6: Ondulação (LNEC, 2005)

As rodeiras (Figura 7), talvez a deformação mais comum nos pavimentos, são deformação longitudinal, localizadas na zona de passagem dos rodados dos veículos. Podem ser consideradas de pequeno ou grande raio. As principais causas para o seu aparecimento são: capacidade deficiente das camadas granulares e da fundação; misturas betuminosas com reduzida resistência à deformação plástica (ligante mole, dosagem incorreta do ligante, deficiente qualidade dos agregados); Compactação insuficiente das camadas em geral.



Figura 7: Rodeira presente na Avenida da Universidade (fotografia de autor)

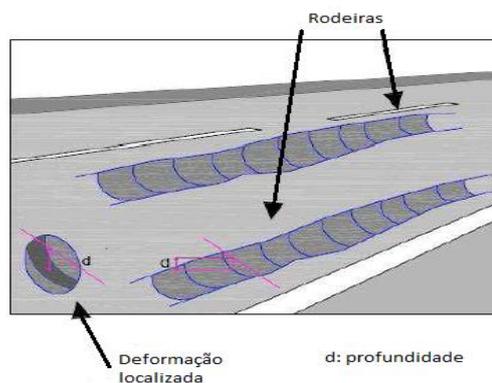


Figura 8: Esquema de como determinar a profundidade de uma rodeira e de uma deformação localizada (Estradas de Portugal, 2008)

A capacidade deficiente das camadas granulares e da fundação origina rodeiras de grande raio e as misturas betuminosas com reduzida resistência à deformação plástica dão origem a rodeiras de pequeno raio. A rodeira externa é normalmente a que apresenta maior deformação, devido à maior instabilidade da estrutura junto à berma (Estradas de Portugal, 2008; LNEC, 2005; EP-JAE, 2006; Branco *et al.*, 2006; Benta, 2012).

2.2.Fendilhamento

O fendilhamento é o tipo de degradação mais frequente nos pavimentos flexíveis e apenas ocorre nas camadas constituídas por misturas betuminosas.

Uma das causas do aparecimento do fendilhamento explica-se pelo facto de as camadas betuminosas estarem sujeitas a ciclos de esforços de tração por flexão, devido à ação repetitiva de esforços provocados pela passagem do tráfego, levando à fadiga dos materiais das camadas betuminosas. Esta degradação é um dos sinais de que o pavimento está a perder capacidades estruturais para que foi dimensionado.

Para além do fendilhamento por fadiga, que tem origem na base das camadas betuminosas, devido aos esforços anteriormente mencionados, existem mais dois tipos de mecanismos: a reflexão de fendas e o fendilhamento com origem à superfície.

A reflexão de fendas provoca fendilhamento através da propagação de fendas existentes nas camadas subjacentes até às camadas betuminosas, este fenómeno verifica-se em pavimentos fendilhados que beneficiaram de medidas de reforço.

O fendilhamento com origem à superfície tem tendência a surgir em pavimentos com tráfego pesado e intenso. Os esforços provocados pelos rodados dos veículos induzem tensões na interface entre o pneu e o pavimento, capazes de provocar fissuras. O deficiente processo construtivo, como uma má compactação ou má formulação da mistura, também poderá causar o aparecimento de fissuras à superfície.

O fendilhamento abrange uma grande diversidade de degradações, desde as fendas isoladas e ramificadas às fendas que formam uma malha, a pele de crocodilo. Este é o grupo mais importante do fendilhamento e consiste na interligação das fendas abrangendo uma área significativa da via. Forma-se uma malha inicialmente larga que, com o tempo, vai ficando do tipo estreito (Branco *et al.*, 2006; Pereira & Miranda, 1999; Alves, 2007; Antunes, 2005).

De seguida são descritas algumas das degradações que pertencem à família do fendilhamento assim como a ilustração de alguns exemplos.

As fendas de fadiga localizam-se na zona de passagem dos rodados dos veículos, com a tendência a progredirem longitudinalmente e numa fase mais avançada, transversalmente e em outras direções, designando-se nesta última fase como fendas ramificadas (Figura 10). As possíveis causas são: a fadiga das camadas betuminosas; a falta de capacidade de suporte das camadas granulares e do solo de fundação e a camada de desgaste apresentar materiais com qualidade deficiente.

A Figura 9 representa uma fissura isolada presente na Avenida da Universidade. Esta fissura, com uma abertura considerável, tem como causa a instabilidade de uma obra de drenagem, nomeadamente uma conduta.



Figura 9: Fenda isolada presente na Avenida da Universidade (fotografia de autor)



Figura 10: Fenda ramificada presente na Avenida da Universidade (fotografia de autor)

As fendas longitudinais localizam-se ao longo da estrada e, em maior número, junto das bermas ou do eixo da estrada, zona onde os rodados dos veículos passam. A causa provável do aparecimento das fendas junto ao eixo é a deficiente execução construtiva da junta longitudinal, junta que faz a união das duas camadas betuminosas. Quanto à causa para o aparecimento das fendas junto à berma deve-se a problemas a nível da drenagem, que provocam diferenciais de capacidade de suporte junto à berma. Uma outra causa associada às fendas longitudinais é a elevada rigidez das misturas betuminosas, originando abertura de fendas por retração.

As fendas transversais, tal como o nome indica, são fendas perpendiculares ao eixo da estrada abrangendo parte ou a totalidade da via. A deficiente execução da junta transversal, a retração

térmica da camada de desgaste, a capacidade de suporte diferencial da fundação e deficiente execução do pavimento junto a obras de arte são alguns dos fatores que justificam o aparecimento deste tipo de degradação.

Por último, as fendas parabólicas manifestam-se na zona de passagem do tráfego, normalmente com o eixo da parábola orientado no sentido longitudinal. Este tipo de degradação surge como consequência de problemas de instabilidade da camada de desgaste e da sua ligação às camadas subjacentes, de elevados esforços tangenciais induzidos pelos rodados do tráfego e de temperaturas elevadas.

A pele de crocodilo é o grupo mais importante do fendilhamento, resultado da evolução das fendas ramificadas que passam a formar uma malha de fendas. Este tipo de degradação localiza-se inicialmente na zona de passagem dos veículos, ou seja, nas zonas coincidentes com as rodadeiras, formando uma malha de dimensão variável, abrangendo progressivamente toda a largura da via. As causas do surgimento da pele de crocodilo podem ser as mesmas que foram anteriormente descritas para as fendas ramificadas, visto que este tipo de degradação resultar da evolução das mesmas. Conclui-se que para a pele de crocodilo contribuem as causas já mencionadas anteriormente para o fendilhamento na generalidade.

A Figura 11 apresenta um troço do pavimento da Avenida da Universidade com pele de crocodilo, de malha estreita e fendas abertas, no estado de ruína estrutural. Na Figura 12 é visível a pele de crocodilo com fendas abertas e malha larga, neste caso o troço em causa não está em ruína estrutural mas sim num estado avançado de degradação.



Figura 11: Pele de crocodilo de malha estreita presente na Avenida da Universidade (fotografia de autor)



Figura 12: Pele de crocodilo de malha larga presente na Avenida da Universidade (fotografia de autor)

A evolução da pele de crocodilo contribui para a desagregação dos bordos das fendas, permitindo aumentar a abertura das fendas e, conseqüentemente, mais severa será a ação das cargas e da água, contribuindo para a redução da capacidade de suporte do solo de fundação e das camadas granulares. Por sua vez, as camadas betuminosas estarão sujeitas a maiores esforços de tração por flexão, acelerando o processo de degradação.

A pele de crocodilo de malha larga evolui para uma de malha estreita, as fendas evoluem de fechadas para abertas e, este conjunto de evoluções pode originar ninhos e, em certos casos, a formação de peladas (Branco *et al.*, 2006; EP-JAE, 2006; Estradas de Portugal, 2008; Benta, 2012; LNEC, 2005).

2.3.Desagregação da Camada de Desgaste

A desagregação da camada de desgaste consiste na deterioração da superfície do pavimento (camada de desgaste) devido à evolução da própria camada, em que o ligante betuminoso perde as propriedades iniciais, provocando instabilidade na ligação entre os materiais que constituem a mistura betuminosa. Existem outras possíveis causas, desde deficiências na execução da camada de desgaste, segregação dos inertes em central (durante o transporte ou na sua colocação), utilização de betume deficiente, presença de água (durante a realização da mistura) e condições de temperatura desfavoráveis na fase de execução, em que temperaturas muito baixas afetam a compacidade da camada (Branco *et al.*, 2006).

A desagregação também está associada à evolução de outras degradações, nomeadamente o fendilhamento, que possibilita o destacamento de material devido à abertura de fendas.

Estradas de Portugal (2008) considera que existem cinco tipos de degradações na família das desagregações da camada de desgaste, considerando o polimento dos agregados como tal. Os restantes tipos de degradações são a desagregação superficial, as peladas, os ninhos e a cabeça de gato. Seguidamente será descrito em que consiste cada uma das degradações descritas e as respetivas causas.

Na Figura 13 observam-se as principais diferenças entre os diversos tipos de desagregações existentes.

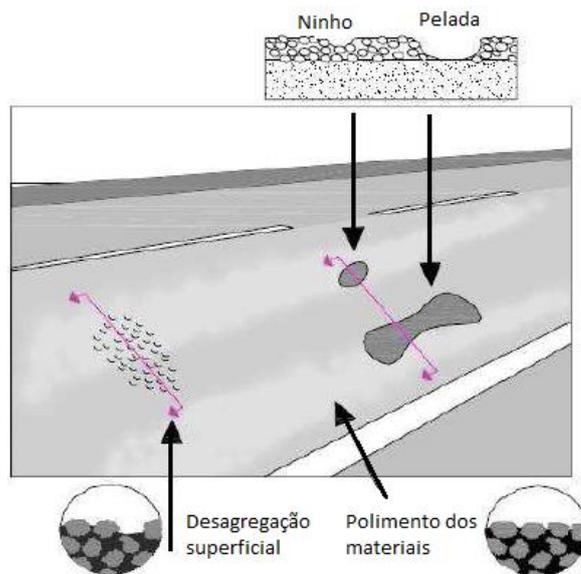


Figura 13: Tipos de desagregações e de polimentos da camada de desgaste (Estradas de Portugal, 2008)

A desagregação superficial (Figura 14) consiste no arranque da fração do agregado, geralmente a mais grossa, devido à perda de ligante betuminoso.



Figura 14: Desagregação superficial e polimento dos agregados na Avenida da Universidade (fotografias de autor)

A cabeça de gato, outro tipo de desagregação que surge quando o material mais fino da camada de desgaste se desprende do material mais grosseiro, fazendo com que o agregado mais grosso se torne mais saliente. O aumento do ruído é uma das consequências deste tipo de desagregação, assim como o aumento do desgaste dos pneus dos veículos.

A ocorrência do desprendimento da camada de desgaste relativamente à camada subjacente designa-se pelada. As causas mais prováveis são a espessura reduzida da camada de desgaste, uma deficiente ligação entre a camada de desgaste e a camada inferior, a deficiente qualidade dos materiais da camada de desgaste ou até mesmo a falta de estabilidade da camada de

desgaste. No troço em estudo da Avenida da Universidade existiam algumas peladas (Figura 15), nas quais é notória uma elevada profundidade atingindo a camada de regularização.



Figura 15: Pelada existente na Avenida da Universidade (fotografias de autor)

Na Figura 16 verifica-se a desagregação da camada de desgaste, onde a evolução da degradação pele de crocodilo deu lugar a um ninho. Este é outro tipo de desagregação, em forma de cavidade arredondada, localizada na camada de desgaste, podendo expandir-se para camadas subjacentes.



Figura 16: Ninho existente na Avenida da Universidade (fotografias de autor)

O polimento dos agregados consiste no desgaste por erosão, concedendo à superfície da camada de desgaste um aspeto brilhante e polido. Este fenómeno resulta numa redução do atrito entre os pneus e o pavimento, causando insegurança na circulação dos veículos (LNEC, 2005; Branco *et al.*, 2006; EP-JAE, 2006; Estradas de Portugal, 2008; Pereira & Miranda, 1999; Pinto, 2003).

2.4. Movimentos de Materiais

Esta degradação consiste na movimentação de materiais constituintes das camadas, quer betuminosas quer granulares, e até da fundação, através das camadas do pavimento.

Os dois fenómenos mais frequentes neste tipo de degradação são a subida de finos e a exsudação de betume.

A subida de finos ou bombagem de finos acontece quando existe movimentação de material entre camadas, este fenómeno verifica-se em pavimentos com camadas betuminosas fendilhadas, ao mesmo tempo que as ações climáticas e as condições de drenagem contribuem para a existência de níveis de água à cota das camadas do pavimento. Este conjunto de particularidades contribui para a subida de finos, devido à compressão exercida pela passagem dos rodados dos veículos, que provoca a expulsão de água para a superfície, arrastando consigo finos das camadas atravessadas.

A exsudação (Figura 17) ocorre sobretudo na zona de passagem dos rodados dos veículos e manifesta-se num excesso de ligante na superfície da camada de desgaste. A migração do ligante para a superfície pode ter como origem numa deficiente formulação da camada de desgaste (excesso de ligante, ligante de reduzida viscosidade, excesso da fração fina dos agregados), associada a ações climáticas adversas (temperaturas elevadas) e a condições severas de tráfego (Branco *et al.*, 2006; Estradas de Portugal, 2008; EP-JAE, 2006).

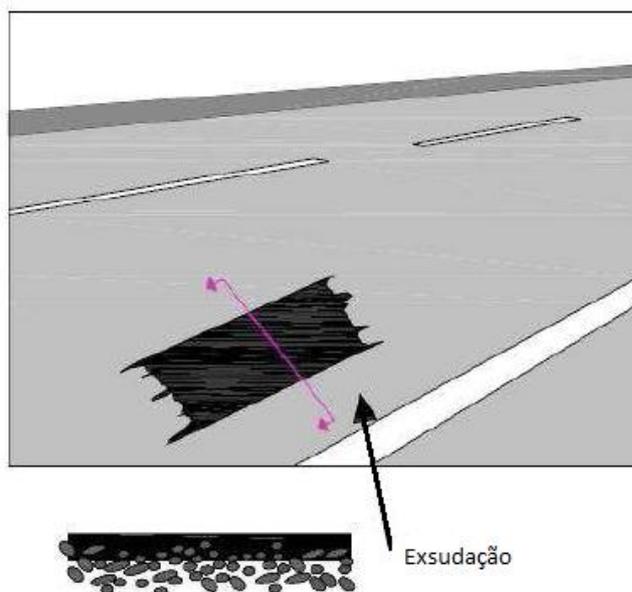


Figura 17: Exsudação (Estradas de Portugal, 2008)

2.5.Reparações

São vários os autores que não consideram as reparações como uma anomalia, contudo, são zonas onde sistematicamente evoluem prematuramente várias degradações, comparativamente com o restante pavimento, devido à fraca qualidade de execução das mesmas. Porém, como anteriormente mencionado, o Catálogo de Degradações elaborado pelas Estradas de Portugal considera as reparações observáveis na camada de desgaste como uma patologia, pois por melhor que sejam realizadas criam descontinuidades, e tornam-se em potenciais locais ao aparecimento de novas degradações (EP-JAE, 2006; Branco *et al.*, 2006).

A Figura 18 faz alusão a diversas reparações visíveis no pavimento da Avenida da Universidade, em que por vezes a reparação é executada com materiais totalmente distintos daqueles que o pavimento possui. Pode-se verificar que a ligação dos diferentes materiais não foi corretamente executada, notando-se a abertura de fendas que, precocemente, irão originar novas degradações.



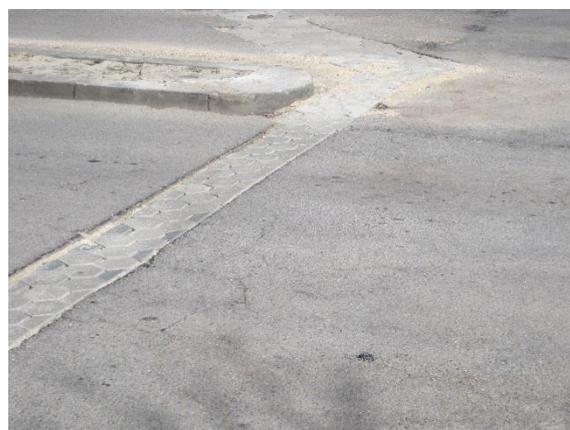
a) Remendo



b) Tapagem de covas



c) Aparecimento de fendas na ligação pavimento/reparação



d) Reparação realizada com material não betuminoso

Figura 18: Diversos tipos de reparações visíveis na Avenida da Universidade (fotografias de autor)

3. AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DOS PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

Após a abertura de determinado pavimento, este começa a ser alvo de variadas solicitações, sendo o tráfego e os agentes climáticos os principais responsáveis. É recomendável que exista uma prevenção constante dos pavimentos, de modo a prevenir situações de ruína. Esta prevenção começa pela recolha de informação sobre o estado da superfície e da estrutura dos pavimentos. A avaliação do estado superficial do pavimento e da capacidade de carga permitem estabelecer estratégias de conservação dos pavimentos.

A avaliação da qualidade global engloba dois domínios fundamentais, a avaliação funcional e a avaliação estrutural.

É necessário para cada um dos domínios anteriormente referidos, definir as técnicas mais ajustadas em função do pavimento que se pretende avaliar.

A avaliação estrutural permite caracterizar mecanicamente os materiais das diferentes camadas do pavimento e da fundação, obtendo-se o modelo estrutural do pavimento e o seu desempenho mecânico, tendo em conta o tráfego pesado e as condições climáticas. A avaliação funcional permite definir um nível de qualidade do pavimento, tendo em conta aspetos como a segurança rodoviária e o conforto (Branco *et al.*, 2006).

3.1. Avaliação do Estado Superficial do Pavimento

Os pavimentos apresentam deterioração gradual desde o momento que se inicia a abertura ao tráfego, sendo que as patologias iniciais sofrem, naturalmente evolução. Compete às entidades avaliar o tipo e a evolução das degradações, possibilitando um melhor controlo da deterioração do pavimento, de forma a agirem atempadamente.

O estado da superfície do pavimento é normalmente o primeiro indicador da degradação dos pavimentos, e é um parâmetro indispensável para avaliar a qualidade funcional. Frequentemente a caracterização do estado superficial tem por base o levantamento das degradações visualmente observáveis aquando das inspeções realizadas, utilizando uma metodologia de avaliação global da qualidade do pavimento, através da qual se obtém um índice de qualidade global (IQ).

A inspeção consiste no levantamento de todas as patologias referidas anteriormente, criando uma base de informação importante, que caracteriza cada tipo de degradação quanto à sua extensão, assim como a sua gravidade. Existem dois métodos para se registrar as degradações: a observação visual ou a observação através de equipamento fotográfico ou de vídeo (Branco *et al.*, 2006).

O método mais prático é a observação visual, que consiste na deslocação de um operador, que preenche formulários com as diversas patologias ao longo da via. Este método é muito subjetivo, visto que a análise das degradações pode diferir de operador para operador. Para diminuir a subjetividade que possa existir na análise das degradações existe um Catálogo de Degradações, onde estão discriminadas todas as degradações existentes, assim como o seu nível de gravidade. Consiste numa ferramenta bastante completa permitindo uma correta identificação das degradações presentes.

Segundo Branco *et al.*, (2006) o Catálogo de degradações deverá ter para cada tipo de degradação e por tipo de pavimento a seguinte informação:

- Definição ou descrição sumária do tipo de degradação para apoiar a identificação das degradações existentes;
- Definição dos níveis ou classes de gravidade, de modo a permitir a quantificação das degradações;
- Indicação do modo de medir ou avaliar as degradações;
- Indicação das possíveis causas e correspondentes evoluções mais prováveis.

Para além dos registos dos diferentes tipos de degradações em formulários específicos também é possível o seu registo em suporte informático. Para tal o LCPC (*Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*) criou um *software* assistido por computador, designado por DESY, com a finalidade de facilitar o registo de toda a informação captada visualmente pelo operador. Um outro equipamento idêntico é o VIZIROAD, em que o tipo de funcionamento é semelhante ao processo DESY. Estes dois processos são constituídos por dois teclados para a introdução dos dados e são ligados a um microcomputador, onde estão instalados os respetivos programas (Pereira & Miranda, 1999).

O método através da utilização de equipamento do tipo fotográfico ou vídeo consiste num sistema de vídeo montado num veículo, sendo que a câmara de vídeo ou o equipamento fotográfico se situa no tejadilho. Este registo é mais rápido que o anterior, sendo posteriormente as imagens analisadas em gabinete, conferindo o tempo necessário para identificar corretamente o tipo de degradação e a sua gravidade, avaliando assim o estado do pavimento.

O LCPC desenvolveu o sistema GERPHO (*Groupe d'Examen Routier par PHOtographie*) que permite realizar uma observação mais precisa e com elevado rendimento. O GERPHO consiste num veículo, que possui uma câmara fotográfica de alta resolução situada na parte superior do veículo, possibilitando registar degradações do pavimento na posição vertical, conforme demonstrado na Figura 19.

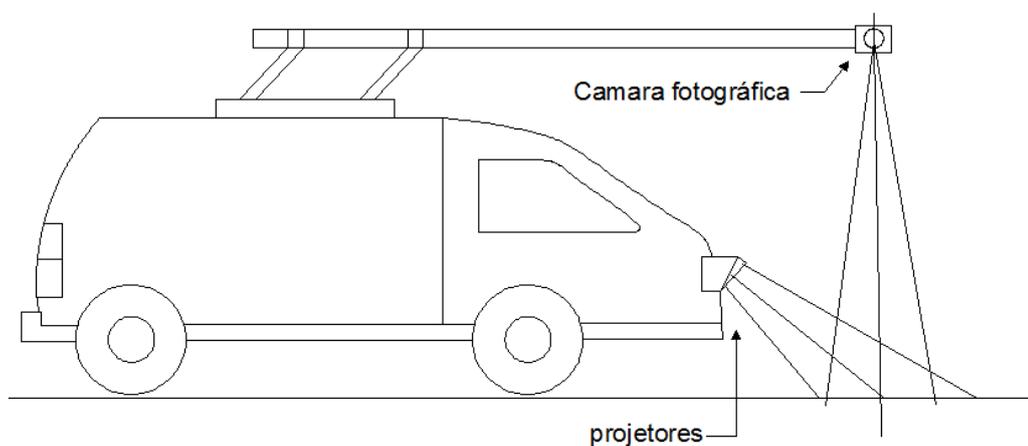


Figura 19: GERPHO (Pereira & Miranda, 1999)

Este equipamento tem a vantagem de ser mais rápido relativamente ao levantamento manual, contudo não permite detetar deformações importantes como as rodeiras e o microfendilhamento. Este tipo de deformações só é possível detetar através da observação visual ou através de equipamentos específicos (Branco *et al.*, 2006).

Para além dos já referidos, existem outros métodos como por exemplo, o equipamento ARGUS que é constituído por um conjunto de lasers, câmaras, sensores e *scanners* que registam detalhadamente a superfície do pavimento. Este equipamento permite efetuar inspeções exaustivas, com grande detalhe e a velocidades entre os 80 km/h e os 100 km/h (CM, 2009).

3.1.1. Índice de Qualidade

Segundo Picado-Santos *et al.*, (2006), para avaliar a qualidade dos pavimentos pode recorrer-se a uma metodologia que avalia globalmente a qualidade do pavimento e que permite determinar um índice de qualidade global (IQ), independentemente do método utilizado no levantamento visual das degradações.

O Índice de Qualidade tem em consideração as diferentes degradações superficiais, a irregularidade longitudinal (IRI) e a profundidade média das rodeiras, avaliando a qualidade atual do pavimento e, conseqüentemente, a necessidade ou não de intervenção imediata ou a curto prazo. O Índice de Qualidade traduz-se pela expressão (1) a seguir apresentada.

$$IQ = 5 \times e^{-0.0002598 \times IRI/2} - 0.002139 \times R^2 - 0.03 \times (C + S + P)^{0.5} \quad (1)$$

Em que:

IRI – Irregularidade longitudinal do pavimento (*International Roughness Index*) (mm/km);

R – Profundidade média das rodeiras (mm);

C – Área com fendilhamento e pele de crocodilo (m²/100m²);

S – Área com degradação superficial de materiais (covas e peladas) (m²/100m²);

P – Área com reparações (m²/100m²).

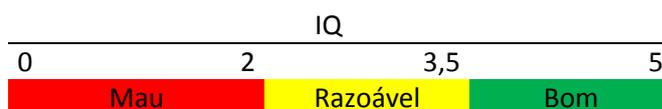


Figura 20: Indicação qualitativa dos intervalos do Índice de Qualidade

Segundo a Figura 20, o Índice de Qualidade varia entre 0 e 5, representando IQ=0 um pavimento em muito mau estado e IQ=5 um pavimento em muito bom estado. O valor de IQ=2 é adotado geralmente como um indicador de necessidade de intervenção, situando-se este limite entre o mau estado e o razoável (Picado-Santos *et al.*, 2006).

É possível quantificar para cada segmento a área afetada de cada tipo de degradação, com o respetivo nível de gravidade através da tabela que se encontra no Anexo I.

Quando não há possibilidade de avaliar diretamente a irregularidade longitudinal, obtém-se o valor do IRI através do princípio de que o valor deste índice depende das degradações, tendo como base para a quantificação uma tabela já preestabelecida (Tabela 1), onde os níveis de gravidade para cada degradação considerada resultam da ponderação dos níveis de gravidade registados ao longo do troço, ponderados em função das respetivas extensões de ocorrência.

Tabela 1: Quantificação do IRI, na ausência de medição direta (Picado-Santos *et al.*, 2006)

Degradação	Condição	Nível	IRI
Fendilhamento pele de crocodilo	\leq	1	Tipo 1: IRI=1500mm/km
e			
Peladas, etc.	\leq	1	
e			Tipo 2: IRI=2500mm/km
Rodeiras	\leq	1	
Fendilhamento pele de crocodilo	=	3	Tipo 3: IRI=3500mm/km
ou			
Peladas, etc.	=	3	
e			
Rodeiras	\geq	2	

A irregularidade longitudinal é a variação altimétrica da superfície de um pavimento, em relação a um perfil ideal. É um parâmetro determinante nas condições de rolamento dos veículos, condicionando diretamente o conforto e a segurança da circulação.

3.2. Avaliação da Capacidade Estrutural do Pavimento

A avaliação da capacidade de carga depende da caracterização do comportamento estrutural do pavimento. A informação obtida pela auscultação, designadamente as deflexões, permitem caracterizar os materiais das diferentes camadas do pavimento e da fundação, idealizando o modelo estrutural do pavimento. Entende-se por deflexão a deformação vertical da superfície, sendo a resposta do pavimento à aplicação de uma determinada carga, em determinadas condições.

As deflexões são o melhor indicador da qualidade estrutural do corpo do pavimento, nomeadamente das camadas granulares e do solo de fundação no caso dos pavimentos flexíveis. Quando num pavimento se verifica uma deflexão elevada pode corresponder a um pavimento em mau estado, todavia um pavimento pode apresentar deflexões reduzidas e estar igualmente em mau estado. Embora a capacidade estrutural possa ser satisfatória, a camada de desgaste

pode estar degradada, sendo necessário uma intervenção de caráter funcional (Pereira & Miranda, 1999).

Os ensaios de carga não implicam a destruição dos pavimentos, não incomodando assim a circulação do tráfego, além disso são mais expeditos, possibilitando um maior número de ensaios, levando a uma caracterização dos troços em estudo mais completa (Antunes, 1993).

A capacidade de carga dos pavimentos é determinada a partir de equipamentos que registam a deflexão, podendo este procedimento ser realizado em modo estacionário ou em movimento de velocidade reduzida, são normalmente designados por deflectómetros ou deflectógrafos.

Existem diversos equipamentos que permitem determinar a deflexão dos pavimentos rodoviários, os mais representativos são os seguintes:

- Viga Benkleman;
- Deflectógrafo FLASH;
- Curviâmetro;
- Deflectómetro de Impacto.

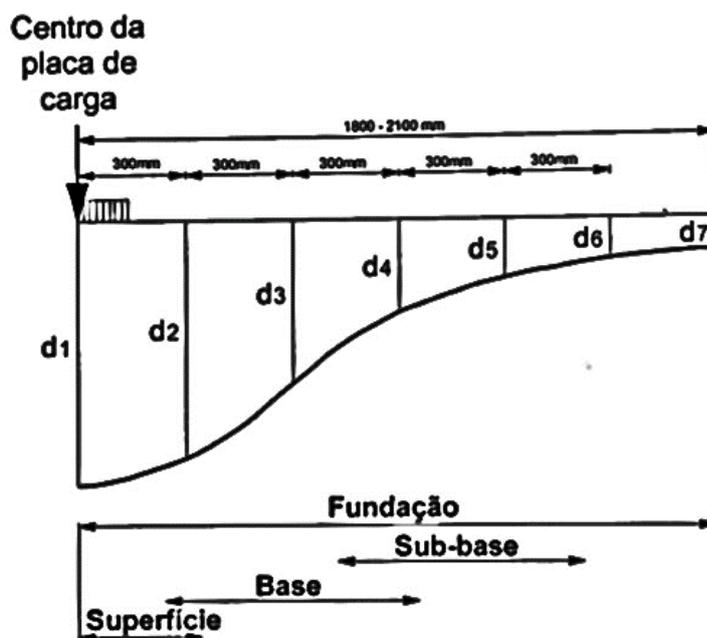


Figura 21: Representação da bacia de deflexões e a influência das camadas de um pavimento flexível (Fontul, 2004)

No presente trabalho não se recorreu a nenhum destes equipamentos, por essa razão nenhum dos equipamentos será descrito.

A bacia de deflexão (Figura 21) ilustra a respostas das camadas estruturais à aplicação de uma carga. A bacia de deflexão diminui com a profundidade e com a distância ao centro de aplicação da carga e depende ainda do módulo de deformabilidade (Antunes, 1993).

3.3.Avaliação da Constituição do Pavimento

Um parâmetro muito relevante no estudo dos pavimentos passa pelo conhecimento da sua estrutura. As sondagens são ensaios que visam complementar a auscultação, através do conhecimento das espessuras das camadas. Posteriormente em laboratório são determinadas as diversas características dos materiais amostrados.

Os carotes cilíndricos (Figura 22) e a abertura de poços (Figura 23) são as sondagens recorrentes para a obtenção da estrutura e da constituição dos pavimentos. Os carotes são menos destrutivos, todavia permitem apenas a obtenção das camadas ligadas (camadas betuminosas). Com a abertura de poços é possível identificar as espessuras, retirar amostras das camadas subjacentes às camadas ligadas, as camadas granulares, podendo, caso seja necessário, retirar amostras da fundação. Este último processo permite ter uma perspetiva visual de todo o conjunto, embora seja um processo lento e destrutivo em relação às sondagens realizadas à rotação (Eugénio, 2008).

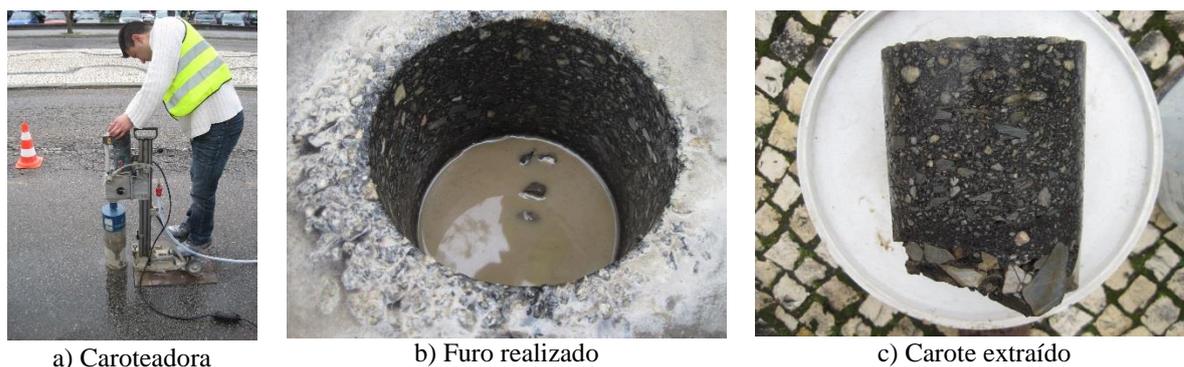


Figura 22: Execução de sondagens à rotação e carote extraído do pavimento em estudo da Avenida da Universidade (fotografias de autor)



Figura 23: Poço realizado na Avenida da Universidade (fotografia de autor)

Com as amostras recolhidas através da realização de sondagens (carotes e abertura de poços) é possível em laboratório determinar alguns parâmetros importantes para a caracterização do pavimento. Através das misturas betuminosas é possível obter-se o teor de betume, as baridades, a porosidade, a temperatura de amolecimento e a penetração do betume a 25°C. Com o material granular retirado consegue-se identificar o material utilizado, o equivalente de areia e a granulometria. O solo de fundação permite realizar o ensaio de Proctor, o equivalente de areia, o CBR (*California Bearing Ratio*) e os limites de Atterberg (Antunes, 1993).

Um outro procedimento para determinar as características geométricas das camadas é o Radar de Prospecção (Figura 24), o equipamento possui duas antenas, sendo uma delas a emissora e a outra a recetora, sendo que qualquer uma delas pode ser utilizada como recetora ou emissora durante o ensaio. A antena emissora emite ondas eletromagnéticas para a superfície. Estas propagam-se verticalmente, e quando ocorrer mudança de material uma parte é refletida. A antena recetora recebe as ondas refletidas, as quais permitem obter conhecimento sobre a estrutura do pavimento, já que a amplitude das ondas está associada a diferenças nas camadas dielétricas de duas camadas confinantes. Com o conhecimento do intervalo de tempo entre a emissão e receção das ondas eletromagnéticas e sabendo as velocidades das ondas, é possível determinar a espessuras das camadas do pavimento.

Nos pavimentos flexíveis é possível, através deste método, a obtenção da delimitação entre as camadas que constituem um pavimento, nomeadamente a delimitação entre as camadas betuminosas e o material granular, e delimitação entre material granular e solo de fundação, como ilustra a Figura 24 (Fontul, 2004).

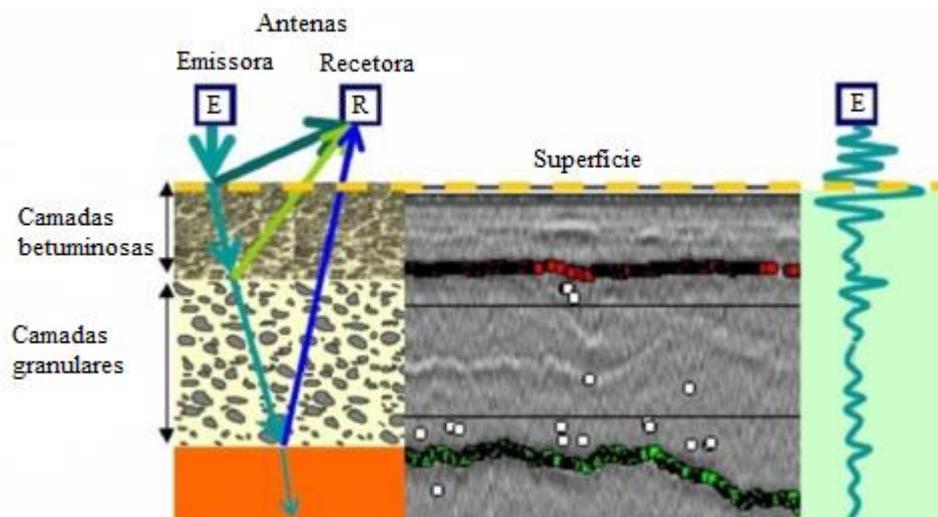


Figura 24: Princípio de funcionamento do Radar de Prospecção em pavimento flexível (Fontul, 2004)

Conhecida a constituição de um dado pavimento, adotando os coeficientes de *poisson* recorrentes para cada material, é possível determinar os módulos de deformabilidade de cada camada, de forma a definir o modelo de comportamento estrutural (Pereira & Miranda, 1999).

4. CONSERVAÇÃO E REABILITAÇÃO DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS

4.1. Introdução

Os pavimentos rodoviários durante o seu tempo de vida útil estão sujeitos a diversas ações, ações do tráfego e climáticas, as quais deterioram o nível de qualidade inicialmente estabelecido, que assegura as condições de segurança, economia e conforto. Anos depois da abertura ao tráfego, o pavimento atinge um estado que não cumpre os critérios mínimos de funcionalidade. Este intervalo de tempo, desde o início da sua vida até não cumprimentos dos critérios mínimos, designa-se por vida útil ou vida de serviço do pavimento.

Deverão ser tomadas medidas de conservação durante a vida útil do pavimento, prolongando ou preservando o tempo estimado inicialmente. Acabando este período, torna-se imprescindível proceder à sua reabilitação, repondo as características iniciais (funcionais e estruturais) ou, caso seja necessário, devido ao aumento do tráfego, melhora-las.

A conservação dos pavimentos tem como principal objetivo assegurar e prolongar a qualidade funcional e estrutural, procurando manter as funções inicialmente estabelecidas. As medidas aplicadas visam preservar e manter um nível de serviço que ofereça aos utentes as melhores condições de circulação possíveis.

Assim sendo, o termo reabilitação utiliza-se quando o objetivo consiste no melhoramento das características, essencialmente das características estruturais. Este melhoramento deve-se ao facto de surgirem novas solicitações para um novo período de vida, especialmente o crescimento do tráfego (Jacinto, 2003; Branco *et al.*, 2006).

Na Figura 25 esquematiza-se graficamente a evolução do estado de um pavimento ao longo do tempo, e as alterações provocadas pela aplicação de medidas de conservação e reabilitação.

A solução de reabilitação de um pavimento é uma solução de longo prazo, e a sua necessidade depende principalmente de aspetos como a ruína estrutural do pavimento, a previsão do crescimento do tráfego pesado e gastos elevados de conservação corrente e/ou periódica (Benta, 2008; Jacinto, 2003).

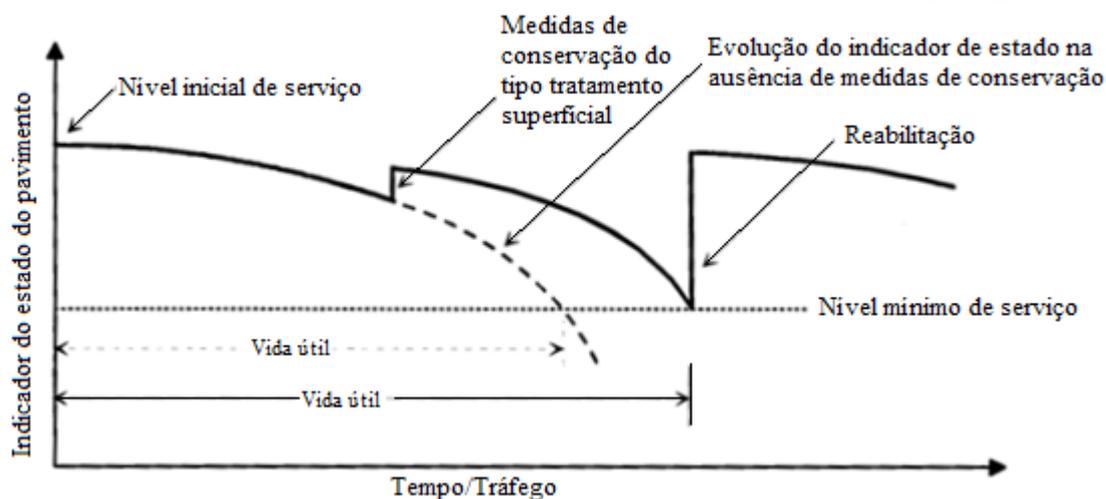


Figura 25: Evolução do estado de um pavimento ao longo do tempo (Batista, 2004)

4.2. Técnicas de Conservação e Reabilitação de Pavimentos

Os pavimentos rodoviários requerem um programa de acompanhamento da sua evolução, de maneira a tomar medidas na altura certa, repondo a qualidade inicial. Estas medidas constituem a atividade de conservação e/ou reabilitação de pavimentos rodoviários.

No capítulo 5 são explicadas as técnicas referentes à atividade de conservação e de reabilitação.

No campo da reabilitação são distinguidas três técnicas, o reforço, a reciclagem e a reconstrução.

O processo de reforço consiste na aplicação de camadas adicionais de material betuminoso sobre o pavimento antigo, recuperando as características funcionais e estruturais do pavimento, prolongando-lhe a vida útil.

Sobre o pavimento antigo são colocadas novas camadas de misturas betuminosas, de forma a suportar as cargas induzidas pelo tráfego e recuperar as características funcionais. Por vezes recorre-se à fresagem das camadas superiores por estas estarem degradadas ou devido a outros condicionalismos, como por exemplo, cotas para a aplicação de novo material betuminoso devido à presença de passeios ou outras galerias. A cota do pavimento deve ser sempre inferior à cota do passeio e de outras galerias, por razões técnicas. O reforço em pavimentos com graves problemas estruturais requer espessuras de reforço elevadas, não sendo viável economicamente (Batista, 2004; Jacinto, 2003).

A reciclagem de pavimentos rodoviários tem vindo a tornar-se uma hipótese plausível, pela reutilização dos materiais e principalmente como solução para a reabilitação de pavimentos degradados. É uma técnica em clara expansão devido a questões ambientais, pois antigamente os critérios adotados no projeto de reabilitação de pavimentos rodoviários focavam-se nos aspetos de ordem técnica e económica, enquanto atual e futuramente se começa a dar mais atenção a aspetos de ordem ambiental (Batista, 2004).

Os tipos de reciclagem estão explícitos no subcapítulo 5.5.

Quando o pavimento se encontra próximo ou já no estado de ruína, as técnicas anteriores pouco poderão contribuir para se restabelecer as características iniciais, neste caso é necessário recorrer à reconstrução.

Esta técnica é normalmente utilizada quando os pavimentos possuem fundações medíocres e/ou camadas granulares de fraca qualidade, sendo necessário melhorar as suas propriedades. Pode-se considerar como a construção de um novo pavimento rodoviário, em que se podem aproveitar os materiais do pavimento antigo para a realização das novas camadas, recorrendo à reciclagem e a tratamentos adequados.

4.3.Fatores de Dimensionamento de Pavimentos Rodoviários

O dimensionamento de pavimentos rodoviários depende da quantificação das ações atuantes, na idealização da estrutura e do tipo de material aplicado.

As solicitações às quais o pavimento será submetido durante o seu período de vida são essencialmente de dois tipos (Silva, 2005; CEPSA, 2006):

- O tráfego, que deve compreender o seu volume, a sua composição, o seu crescimento e o período de vida do projeto. Esta solicitação consiste numa ação vertical e noutra tangencial entre o pneu e o pavimento;
- Os agentes climáticos a que está submetido o pavimento têm uma grande influência no seu comportamento. A ação da água nas camadas granulares e no solo de fundação diminui a capacidade de carga e provoca a erosão através do arrastamento de finos. A ação da temperatura provoca o envelhecimento do betume e propicia o fendilhamento e o aparecimento de deformações nas camadas betuminosas.

A característica mecânica mais condicionante para os materiais que constituem um pavimento rodoviário é o módulo de deformabilidade (E). Outra característica a ter em conta é o coeficiente de *Poisson* (ν).

Os módulos de deformabilidade podem ser determinados a partir de fórmulas específicas ou recorrendo a processos de retroanálise. Já o coeficiente de *Poisson*, na maioria dos casos, trata-se de um valor já estabelecido para cada tipo de material.

Na Tabela 2 apresentam-se os valores representativos dos módulos de deformabilidade e dos coeficientes de *Poisson* de vários materiais usados nos pavimentos rodoviários.

Tabela 2: Valores representativos dos módulos de deformabilidade e dos coeficientes de *Poisson* de vários materiais usados nos pavimentos rodoviários (Domingos, 2007; EP-JAE, 1995)

Material	Módulo de deformabilidade típicos (MPa)	Coeficiente de <i>Poisson</i>	
		Típicos	Adotados pelo MACOPAV
Misturas betuminosas	1500 a 10000	0,35 a 0,40	0,35
Materiais granulares	50 a 1500	0,30 a 0,40	0,35
Solos	5 a 300	0,35 a 0,45	0,4
Materiais tratados com cimento (solo-cimento)	2000	0,3	0,3

4.3.1. Tráfego

A ação mais preponderante no dimensionamento de pavimentos novos ou de reforços é o tráfego, sendo fundamental o estudo da evolução do tráfego dos pavimentos. Normalmente para o dimensionamento do reforço de pavimentos rodoviários flexíveis opta-se por um período de vida útil de 10 anos.

O MACOPAV define a metodologia de determinação do número acumulado de eixos-padrão para um período de dimensionamento. Nesta metodologia apenas é considerado o efeito do tráfego dos veículos pesados, sendo estes os principais responsáveis pela deterioração dos pavimentos, designado por tráfego médio diário anual de veículos pesados no ano de abertura ($TMDA_p$), determinado em cada sentido de circulação e na via mais solicitada (geralmente a via da direita) (EP-JAE, 1995).

Segundo o MACOPAV, o tipo de tráfego a considerar no dimensionamento pode ser classificado em seis tipos de classes, sendo atribuída a cada uma delas uma taxa de crescimento anual (t).

De modo a traduzir o efeito da intensidade e variabilidade dos veículos pesados nos pavimentos rodoviários é utilizado um fator de agressividade (α), por eixo-padrão. Este fator depende do tráfego médio diário anual de veículos pesados no ano de abertura, associado a uma taxa de crescimento anual.

O eixo-padrão é uma forma de homogeneizar o efeito das passagens de veículos pesados de diversas características. Em Portugal é usual adotar-se o eixo-padrão de 80 kN para pavimentos flexíveis, enquanto noutros países se usa o eixo-padrão de 130 kN, aproximando-se das cargas máximas legais dos eixos simples.

O eixo-padrão corresponde a um eixo simples com rodados (duas rodas gêmeas) nas extremidades, separadas por um comprimento “L”. A área de contacto de cada roda com o pavimento é aproximadamente elíptica, no entanto por simplicidade considera-se como circular de raio “r”. A pressão “p” de contato considera-se igual à pressão de enchimento dos pneus.

Na Figura 26 está representado o esquema de um eixo-padrão assim como a sua ação sobre o pavimento.

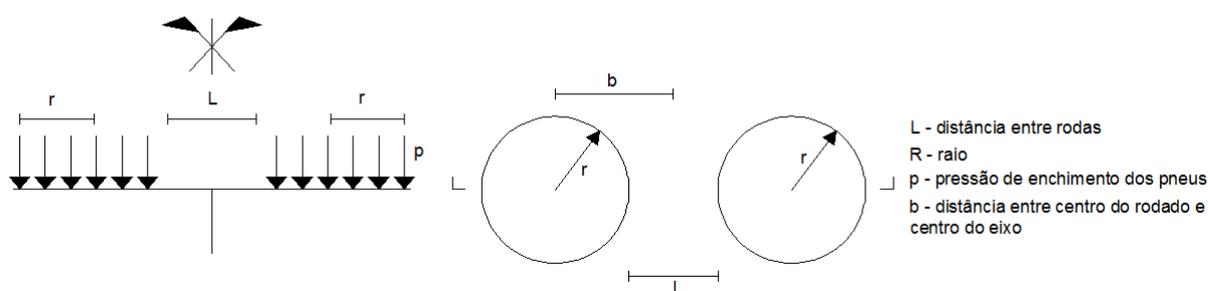


Figura 26: Esquema adotado para a secção de um eixo-padrão sobre um pavimento (Branco *et al.*, 2006)

Os valores considerados para “L”, “r” e “p” no método da Shell apresentam-se na Tabela 3.

Tabela 3: Valores de “L”, “r” e “p” pelo método da Shell

Comprimento – L (mm)	Raio – r (mm)	Pressão – p (MPa)	Distância – b (mm)
105	105	0,6	157,5

No presente trabalho adotou-se o método da Shell por ser o que melhor se adequa para zonas com temperaturas médias elevadas, que é o caso de Portugal.

Na Tabela 4 estão descritas as diversas classes de tráfego com as respetivas taxas de crescimento anuais e fatores de agressividade por eixo-padrão, de acordo com o MACOPAV.

Tabela 4: Classes de tráfego, taxa de crescimento anual, fator de agressividade e número de eixo-padrão de 80kN para pavimentos flexíveis (EP-JAE, 1995)

Classe de tráfego	TMDA _p	Taxa de crescimento anual (t)	Fator de agressividade (α)		Pavimentos Flexíveis
			Eixo-padrão de 80 KN	Eixo-Padrão de 130 KN	N ₈₀ (20 anos)
T ₆	50 - 150	3	2,0	0,5	2×10^6
T ₅	150 - 300		3,0	0,6	8×10^6
T ₄	300 - 500	4	4,0	0,7	2×10^7
T ₃	500 - 800		4,5	0,8	4×10^7
T ₂	800 - 1200	5	5,0	0,9	7×10^7
T ₁	1200 - 2000		5,5	1,0	10×10^7

O número de veículos pesados para o ano n, com a taxa de crescimento correspondente ao TMDA_p é dada através da expressão (2).

$$N_p^n = TMDA \times \frac{(1+t)^n - 1}{t} \times 365 \quad (2)$$

Onde:

N_p^n – Número acumulado de pesados no ano n;

t – Taxa de crescimento anual do tráfego pesado;

n – Período de dimensionamento.

Determinado o número acumulado de pesados para o ano 20 recorre-se à Tabela 5 e define-se a classe de tráfego.

Tabela 5: Classes de tráfego definidas pelo número de pesados acumulados em 20 anos (Branco *et al.*, 2006)

Classe de tráfego	Nº de pesados em 20 anos na via de projeto
T ₆	$0,5 \times 10^6 - 1,5 \times 10^6$
T ₅	$1,5 \times 10^6 - 2,9 \times 10^6$
T ₄	$3,3 \times 10^6 - 5,4 \times 10^6$
T ₃	$5,4 \times 10^6 - 8,7 \times 10^6$
T ₂	$9,7 \times 10^6 - 14,5 \times 10^6$
T ₁	$14,5 \times 10^6 - 24,1 \times 10^6$

O número de eixos-padrão de 80 kN é determinado a partir da expressão (3) para o período de dimensionamento.

$$N_{80}^n = N_p^n \times \alpha \quad (3)$$

Onde:

N_{80}^n – Número de eixos-padrão de 80kN de dimensionamento no ano n;

α – Fator de agressividade.

4.3.2. Temperatura de Serviço

As misturas betuminosas são constituídas por materiais de grande suscetibilidade térmica, sendo o betume o material mais sensível à temperatura. A ação da temperatura nos pavimentos reflete-se sobretudo nas propriedades mecânicas das camadas betuminosas, agravando a sua capacidade estrutural quando submetidas à ação do tráfego.

Os módulos de deformabilidade das misturas betuminosas são muito dependentes da temperatura de serviço. As misturas quando submetidas a temperaturas altas exibem módulos de deformabilidade mais baixos, por sua vez quando submetidos a temperaturas baixas apresentam módulos de deformabilidade mais elevados.

A maioria das metodologias de avaliação de desempenho dos pavimentos flexíveis prevê a adoção de uma temperatura de serviço equivalente anual, como sendo a temperatura representativa das condições térmicas de cada pavimento durante a sua vida útil.

O método da Shell (Figura 27) define a temperatura de serviço equivalente anual, em função da espessura das camadas betuminosas e da temperatura do ar equivalente anual, que equivale à temperatura média mensal do ar no mês mais representativo do ano. A temperatura do ar equivalente anual é determinada através de fatores de transformação das temperaturas médias anuais do ar, fatores estes que dependem da região e são habitualmente de fácil acesso (Branco *et al.*, 2006).

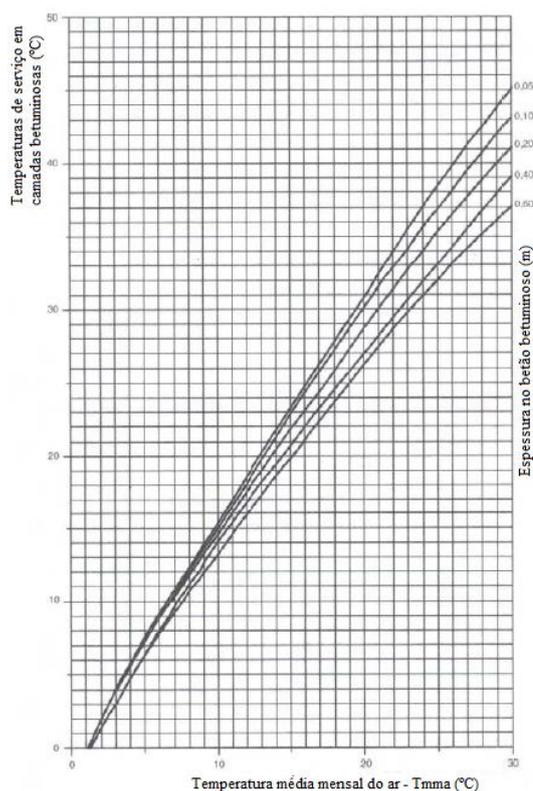


Figura 27: Temperatura de serviço de camadas betuminosas (SHELL, 1977)

No Anexo II encontra-se outro método para a determinação da temperatura de serviço, de uma forma mais direta, porém menos precisa. Consiste em duas tabelas com valores da temperatura de serviço para uma lista de localizações, representativas para uma vida útil de 20 anos. Uma das tabelas destina-se a pavimentos com uma classe de fundação F2 e a outra para pavimentos com uma classe de fundação F3, ambas para diferentes classes de tráfego. Os valores estabelecidos foram determinados através do método empírico-mecanicista da Shell, considerando secções de pavimento flexível com sub-base granular, em material de granulometria extensa com espessura de 20 cm e as restantes camadas constituídas por misturas betuminosas (Baptista, 1999; EP-JAE, 1995).

4.3.3. Fundação dos Pavimentos

A fundação é geralmente constituída por terreno natural ou por material granular em aterro, assim o conhecimento adequado do comportamento geotécnico dos solos de fundação é essencial à análise estrutural dos pavimentos rodoviários.

O módulo de deformabilidade do solo de fundação depende de vários fatores, mas graças à larga experiência obtida com base no recurso do CBR dos solos, autores relacionaram os resultados do CBR com o módulo de deformabilidade.

Quando só se dispõe do valor de CBR para caracterizar a resistência do solo recorre-se a algumas correlações, deduzidas por via empírica (Branco *et al.*, 2006).

O módulo de deformabilidade do solo de fundação é determinado pelas expressões (4) e (5).

$$E_{sf} = 10 \times CBR \quad (4)$$

$$E_{sf} = 17,6 \times CBR^{0,64} \quad (5)$$

Onde:

E_{sf} – Módulo de deformabilidade do solo de fundação (MPa);

CBR – *California Bearing Ratio* (%).

O MACOPAV com base nos módulos de deformabilidade do solo de fundação definiu quatro classes de fundação, que se encontram definidas na Tabela 6.

Tabela 6: Classes de fundação (EP-JAE, 1995)

Classe de fundação	Módulo da fundação (MPa)	
	Intervalo	Valor de cálculo
F ₁	> 30 a ≤ 50	30
F ₂	> 50 a ≤ 80	60
F ₃	> 80 a ≤ 150	100
F ₄	> 150	150

O MACOPAV recomenda a utilização do valor de cálculo no dimensionamento de pavimentos, porém é admissível que em cada classe de fundação o módulo de deformabilidade possa ter outros valores dentro das gamas referidas na Tabela 6 (Branco *et al.*, 2006).

4.3.4. Materiais Granulares

O módulo de deformabilidade das camadas granulares normalmente é considerado constante em toda a espessura da camada, mas na realidade verifica-se que o módulo de deformabilidade varia com a profundidade (Vale, 2004).

Para a camada granular (sub-base) dos pavimentos o valor do módulo de deformabilidade é obtido em função do módulo de deformabilidade do solo de fundação (E_{sf}). Para as camadas granulares seguintes aplica-se o mesmo processo, sempre em função do módulo de deformabilidade da camada subjacente.

Para o cálculo do módulo de deformabilidade das camadas granulares utiliza-se a expressão (6), proposta por Claessen.

$$E_g = K \times E \quad (6)$$

Em que,

$$K = 0,2 \times h^{0.45}$$

Onde:

E_g – Módulo de deformabilidade da camada granular (MPa);

E – Módulo de deformabilidade da camada subjacente (MPa);

h – Espessura da camada granular (mm).

É importante referir que o valor de K a adotar deverá ser superior a 1,5, de maneira a garantir que a camada superior é suficientemente mais resistente que a de baixo. Por sua vez, não deve ser superior a 4, pois só em situações muito controladas é que se poderá admitir uma resistência quatro vezes superior (Branco *et al.*, 2006).

4.3.5. Materiais Betuminosos

Os módulos de deformabilidade das misturas betuminosas a utilizar em novas camadas ou os valores estimados para os módulos de camadas existentes, podem ser obtidos recorrendo ao

método da Shell. Para isso, inicialmente é necessário determinar as características do betume e as características volumétricas das misturas betuminosas (Santos, 2009).

4.3.5.1. Características do Betume

Para o cálculo do módulo de deformabilidade das misturas betuminosas, começa-se por usar o conceito de rigidez de betume (S_b). Esta rigidez define a sua relação entre tensão e extensão, sob determinadas condições de temperatura e de tempo de carregamento.

A rigidez do betume pode ser obtida recorrendo à expressão (7):

$$S_b = 1,157 \times 10^{-7} \cdot t_c^{-0.368} \cdot 2,718^{-IPen} \cdot (Tab - T)^5 \quad (7)$$

Onde:

S_b – Rigidez do betume (MPa);

t_c – Tempo de carregamento (s);

$IPen$ – Índice de penetração do betume;

Tab – Temperatura de amolecimento (°C) pelo método Anel e Bola;

T – Temperatura de serviço a que se encontra o material.

A variável $IPen$ pode ser calculada pela expressão (8), desenvolvida por Pfeiffer e Van Dormal, a qual corresponde ao índice de penetração do betume (Branco *et al.*, 2006).

A expressão (8) só é válida se verificar as seguintes condições:

- $20^\circ\text{C} \leq (Tab - T) \leq 60^\circ\text{C}$;
- $0,01\text{s} \leq t_c \leq 0,1\text{s}$;
- $-1 \leq IPen \leq 1$.

$$IPen = \frac{20 \cdot Tab + 500 \cdot \log(\text{pen}25) - 1955,55}{Tab - 50 \cdot \log(\text{pen}25) + 120,15} \quad (8)$$

Onde:

pen25 – Penetração (10^{-1} mm) do betume a 25°C;

As restantes variáveis têm o mesmo significado que na expressão (7).

No dimensionamento empírico-mecanicista de pavimentos rodoviários flexíveis, deve-se ter atenção a caracterização do betume, visto que esta deve corresponder à situação de serviço. O valor obtido anteriormente pela expressão (7) não tem em conta o endurecimento do betume, relacionado com o fabrico ou colocação em obra das misturas. De forma a considerar este fenómeno, definiram-se as expressões (9) e (10) que permitem estimar as características do betume em serviço, baseadas nas características iniciais deste.

$$pen25_r = 0,65 \cdot pen25 \quad (9)$$

$$Tab_r = 99,13 - 26,35 \cdot \log(pen25_r) \quad (10)$$

Em que as variáveis têm o mesmo significado apresentado nas expressões (7) e (8).

O índice “r” significa que a grandeza se refere a betume recuperado de misturas de serviço, ou seja, o envelhecimento correspondente ao fabrico e colocação em obra da mistura já ocorreu.

O tempo de carregamento pode ser calculado através da expressão (11).

$$tc = \frac{1}{vt} \quad (11)$$

Onde:

tc – Tempo de carregamento (s);

vt – Velocidade média do tráfego pesado (km/h).

4.3.5.2. Características Volumétricas das Misturas Betuminosas

As misturas betuminosas são constituídas por três componentes: ar, betume e agregado. Cada componente é doseada dependendo do tipo de mistura que se pretende, sendo que para definir

as características volumétricas apenas se recorre a três parâmetros: o volume de betume (V_b), o volume de agregados (V_a) e o volume de vazios (V_v) (Branco *et al.*, 2006).

A partir destes três parâmetros é possível determinar-se outras características volumétricas, recorrendo a várias fórmulas. No entanto, apenas se vão referir aquelas que são determinantes para o cálculo dos módulos de deformabilidade das misturas betuminosas, as quais correspondem à percentagem volumétrica de betume (V_b), à percentagem volumétrica de agregados (V_a) e ao volume de vazios do esqueleto da mistura (VMA). Estas características determinam-se recorrendo às seguintes expressões:

$$V_b = \frac{\left(1 - \frac{n}{100}\right) \cdot \left(\gamma_a \cdot \frac{t_b}{100}\right)}{\left(\gamma_a \cdot \frac{t_b}{100} + \gamma_b\right)} \quad (12)$$

$$V_a = \left(1 - \frac{n}{100} - V_b\right) \quad (13)$$

$$VMA = \frac{n}{100} + V_b \quad (14)$$

Onde:

V_b – Percentagem volumétrica de betume;

t_b – Percentagem de betume;

γ_b – Peso específico do betume;

γ_a – Peso específico do agregado;

n – Porosidade;

V_a – Percentagem volumétrica de agregados;

VMA – Volume de vazios no esqueleto da mistura.

4.3.5.3. Cálculo dos Módulos de Deformabilidade das Misturas Betuminosas

Para a previsão do módulo de deformabilidade (E_m) através do método da Shell e para uma rigidez do betume entre 5 MPa e 1000 MPa utiliza-se a expressão (15).

$$E_m = 10^A \quad (15)$$

Em que A é dado por:

$$A = \frac{S89 + S68}{2} \cdot (\log Sb - 8) + \frac{S89 - S68}{2} \cdot |\log Sb - 8| + Sm108 \quad (16)$$

Se a rigidez do betume variar entre 1000 MPa e 3000 MPa utiliza-se a expressão (17).

$$E_m = 10^B \quad (17)$$

Em que B é dado por:

$$B = (Sm3109 - Sm108 - S89) \cdot \frac{\log Sb - 9}{\log 3} + Sm108 + S89 \quad (18)$$

As variáveis apresentadas nas expressões (16) e (18) são determinadas pelas seguintes expressões:

$$S89 = 1,12 \cdot \frac{Sm3109 - Sm108}{\log 30} \quad (19)$$

$$S68 = 0,6 \cdot \log \frac{1,37 \cdot V_b^2 - 1}{1,33 \cdot V_b - 1} \quad (20)$$

$$Sm3109 = 10,82 - \frac{1,342 \cdot (100 - V_a)}{V_a + V_b} \quad (21)$$

$$Sm108 = 8 + 5,68 \times 10^{-3} \cdot V_a + 2,35 \times 10^{-4} \cdot V_a^2 \quad (22)$$

Onde:

E_m – Módulo de deformabilidade da mistura betuminosa (Pa);

S_b – Rigidez do betume (Pa);

V_a – Percentagem volumétrica de agregado;

V_b – Percentagem volumétrica de betume.

Para uma rigidez do betume inferior a 5MPa, a equação (15) deixa de ser válida, pois os materiais apresentam um comportamento não linear, pelo que o seu módulo de deformabilidade deveria ser determinado recorrendo a ensaios mais apropriados (Branco *et al.*, 2006).

4.4. Critérios de Ruína de Pavimentos Flexíveis

O dimensionamento das estruturas projetadas para o reforço de pavimentos rodoviários é realizado com base nos critérios de ruína de pavimentos flexíveis, ou seja, o critério de fadiga, em que ocorre o fendilhamento excessivo com início nas zonas mais tracionadas, associado à extensão horizontal de tração (ϵ_t) que ocorre na base das camadas betuminosas; e o critério de deformação permanente, relacionado com a ocorrência de assentamento excessivo à superfície do pavimento e associado à extensão vertical de compressão (ϵ_z) no topo do solo de fundação.

O critério da fadiga relaciona o valor da extensão instalada depois de um carregamento com o número de vezes que ele pode ser repetido até à ruína do material por fadiga. De forma semelhante, o critério de deformação permanente consiste numa sucessiva aplicação de cargas que conduz a uma acumulação de deformações permanentes, originando uma deformação permanente indesejável (Branco *et al.*, 2006).

No presente trabalho considerou-se apenas o método da Shell para a verificação dos critérios de ruína de pavimentos flexíveis, por este ser o mais adotado em Portugal.

O critério da fadiga consiste no controlo da relação entre a extensão de tração (ϵ_t) na base das camadas betuminosas, que geralmente é a zona mais tracionada, e a vida útil (N_{80}). A lei da fadiga proposta pela Shell permite determinar a referida extensão de acordo com a expressão (23).

$$\varepsilon_t = (0,856 \times V_b + 1,08) \times E_m^{-0,36} \times N_{80}^{-0,20} \quad (23)$$

Onde:

ε_t – Extensão de tração (adimensional);

N_{80} – Número acumulado de passagens do eixo-padrão de 80 kN;

V_b – Percentagem volumétrica de betume;

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

O critério da deformação permanente consiste na relação entre a extensão máxima de compressão (ε_z), geralmente no topo do solo de fundação, e a vida útil (N_{80}). Este critério proposto pela Shell é materializado pela expressão (24):

$$\varepsilon_z = K_s \times N_{80}^{-0,25} \quad (24)$$

Onde:

ε_z – Extensão vertical de compressão no topo do solo de fundação (adimensional);

N_{80} – Número acumulado de passagens do eixo padrão de 80 kN;

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

Este método faz ainda uma verificação complementar à deformação permanente a considerar devido à influência das camadas betuminosas em períodos de comportamento não linear. Quando se recorre à expressão (24) admite-se que todo o assentamento se deve apenas à contribuição do solo de fundação. De forma a ultrapassar esta questão, considera-se uma probabilidade de sobrevivência elevada (95%) na análise do critério de deformação permanente.

4.5. Critérios de Ruína para Misturas com Ligante Hidráulico

No dimensionamento destas camadas utilizam-se leis de fadiga diferentes dos pavimentos flexíveis, pois devido à sua constituição há uma maior distribuição das tensões para as camadas

inferiores. O critério de ruína condicionante é a tensão de tração máxima na base da camada rígida, constituída por um betão pobre ou solo-cimento. Tal como nos pavimentos flexíveis as abordagens de dimensionamento podem ser do tipo empírico-mecanicista ou expedito.

O MACOPAV propõe a seguinte expressão para a lei de fadiga:

$$\frac{\sigma_t}{\sigma_r} = 1 + a \times \log N_{adm} \quad (25)$$

Onde:

σ_t – Valor máximo da tensão de tração induzida pelo eixo padrão (MPa);

σ_r – Resistência à tração em flexão (MPa);

a – Constante que depende da composição e propriedades da mistura, para a qual se admitem valores de -0,06 a -0,1;

N_{adm} – Número admissível de passagens do eixo padrão (130 kN).

4.6. Dimensionamento do Reforço de Pavimentos Rodoviários Flexíveis

O dimensionamento do reforço consiste em recriar as funções necessárias para o bom funcionamento estrutural e funcional da estrutura, para que esta seja capaz de suportar um volume de tráfego e resistir às ações atmosféricas. Porém, todo o processo envolvente contém inúmeras incertezas relacionadas com as diferentes características dos materiais das diversas camadas que constituem o pavimento, variação do tráfego, ações climáticas e, por último, a difícil compreensão do comportamento mecânico dos materiais/camadas.

O dimensionamento do reforço é geralmente realizado através de métodos empírico-mecanicistas ou métodos expeditos, estes últimos não têm em conta as propriedades dos materiais que constituem os pavimentos. Os métodos empírico-mecanicistas têm em consideração diversos parâmetros, dos quais as propriedades dos materiais, a temperatura entre outros (Dias, 2009; Branco *et al.*, 2006).

Os métodos expeditos consistem num pré-dimensionamento, de modo a conferir valores aproximados às espessuras das camadas betuminosas e granulares, através de catálogos. Um

dos métodos disponíveis em Portugal está descrito no Manual de Conceção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional (MACOPAV). Através da quantificação de ações e dos materiais escolhidos é possível através deste manual definir uma solução. Os resultados obtidos podem ser viáveis para vias de tráfego reduzido, porém estes catálogos servem apenas como um estudo prévio (EP-JAE, 1995; Branco *et al.*, 2006).

Os métodos empírico-mecanicistas de dimensionamento de reforço são idênticos aos métodos de dimensionamento de pavimentos novos. A partir da estrutura existente determina-se a espessura de reforço necessária para se obter uma estrutura com resposta suficiente às ações atuantes.

De modo geral, é necessária a verificação do critério da extensão vertical de compressão no topo da camada de fundação e do critério da extensão horizontal de tração na base das camadas betuminosas (Pais, 1999).

Por vezes degradações existentes nos pavimentos existentes aumentam a probabilidade de surgimento de patologias nas camadas de reforço, para combater esse mecanismo, usa-se atualmente um método de verificação, baseado na reflexão de fendas (Pais *et al.*, 2000).

4.6.1. Procedimento Baseado nas Espessuras Efetivas

O procedimento baseado nas espessuras efetivas é um método expedito, desenvolvido pela *Asphalt Institute* (AI, 1983), sendo normalmente usado em pavimentos urbanos com menor importância ou como estudo-prévio de um projeto de pavimentos rodoviários.

O método considera que os danos sofridos pelo pavimento ao longo do seu tempo de vida útil podem ser comparados a uma diminuição da sua espessura. Logo, define-se uma espessura efetiva em vez da espessura real, que representa a sua capacidade resistente atual, para o dimensionamento do reforço do pavimento (Branco *et al.*, 2006).

O uso deste método requer o conhecimento das espessuras e composição das camadas que constituem o pavimento. Estes dados são obtidos através de sondagens, quer por carotagem quer por poço, em zonas que representam as condições médias do pavimento.

O tráfego que solicitará o pavimento para o período que se pretende dimensionar a camada de reforço, expresso em eixos-padrão de 80kN, é estimado segundo a abordagem do subcapítulo 4.3.1.

A espessura efetiva total do pavimento (T_e) é obtida através do somatório das espessuras efetivas parciais, de cada camada. A espessura efetiva da camada i (T_{e_i}) é obtida fazendo o produto dum fator de conversão (C) com a espessura real da camada. O fator de conversão (C) depende principalmente da composição das camadas do pavimento e da degradação visível, conforme indicado na Tabela 7.

A espessura efetiva total obtida corresponde a uma espessura de betão betuminoso, ou seja, para efeitos de análise, transforma-se o pavimento a reforçar num constituído por apenas uma camada de betão betuminoso.

Após a obtenção da espessura efetiva do pavimento, a camada de reforço necessária calcula-se através da expressão (26).

$$T_0 = T_n - T_e \quad (26)$$

Onde:

T_0 – Espessura da camada de reforço necessária;

T_n – Espessura de pavimento constituído apenas por betão betuminoso necessária para suportar o tráfego considerado;

T_e – Espessura efetiva do pavimento.

Tabela 7: Fator de conversão C (Branco *et al.*, 2006)

Tipo	Descrição do material	Fator de Conversão C
I	Leito do pavimento qualquer que seja	0
II	Base ou sub-base granulares britadas de granulometria extensa e CBR>20. (C=0,1 se IP>6)	0,1 - 0,2
III	Base ou sub-bases de solos com IP<10 e estabilizadas com cal ou cimento	0,2 - 0,3
IV	a) Misturas betuminosas a frio em bases, muito fendilhadas e com rodeiras de grande expressão	0,3 - 0,5
	b) Pavimento rígido (mesmo com camada de desgaste em mistura betuminosa) e que vai ser partido antes do reforço em pedaços com 0,5m ou menos. Usar C=0,3 quando a laje tiver sido diretamente aplicada sobre o solo de fundação.	
	c) Base ou sub-bases granulares britadas estabilizadas com cimento, que se apresentem com fendilhamento de contração extensa (usar C=0,3, quando as fissuras tiverem 1cm de espessura ou mais e o material se apresentar instabilizado)	
V	a) Misturas betuminosas a quente em camada de desgaste e de base que exibam fendilhamento apreciável e interligado	0,5 - 0,7
	b) Misturas betuminosas a frio em bases, com fendilhamento fino e com rodeiras de pequena expressão	
	c) Pavimento rígido com fendilhamento apreciável que será partido em bocados de 1 a 4 m ² antes do reforço	
VI	a) Misturas betuminosas a quente em camada de desgaste e de base que exibam fendilhamento fino, com pequena interligação e com rodeiras pequenas	0,7 - 0,9
	b) Misturas betuminosas a frio em bases, sem fendilhamento e com rodeiras de muita pequena expressão	
	c) Pavimentos rígidos com fendilhamento pequeno, em que os pedaços formados não são de dimensão inferior a 1m ²	
VII	a) Misturas betuminosas a quente em camada de desgaste e de base sem fendilhamento e com rodeiras praticamente inexistentes	0,9 - 1,0
	b) Pavimento rígido com camada de desgaste em mistura betuminosa, completamente estável e exibindo fendilhamento de reflexão desprezável	
	c) Pavimento rígido praticamente novo	

O cálculo de T_n é efetuado segundo o ábaco da Figura 28. A espessura efetiva é calculada em função do tráfego (expresso em eixo-padrão de 80 kN) e o módulo do solo de fundação, que pode ser calculado através das expressões (4) e (5).

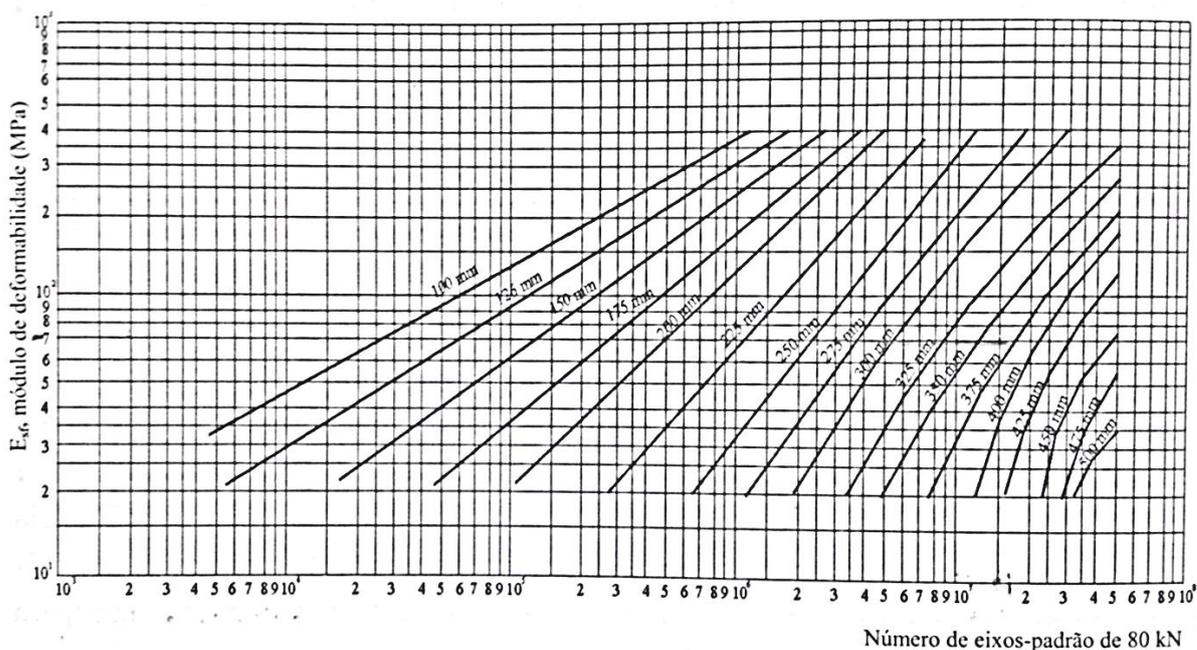


Figura 28: Ábaco da *Asphalt Institute* para o cálculo da espessura de um pavimento só constituído por camadas de betão betuminoso (Branco *et al.*, 2006)

O procedimento deste método resume-se às fases mencionadas na Figura 29.

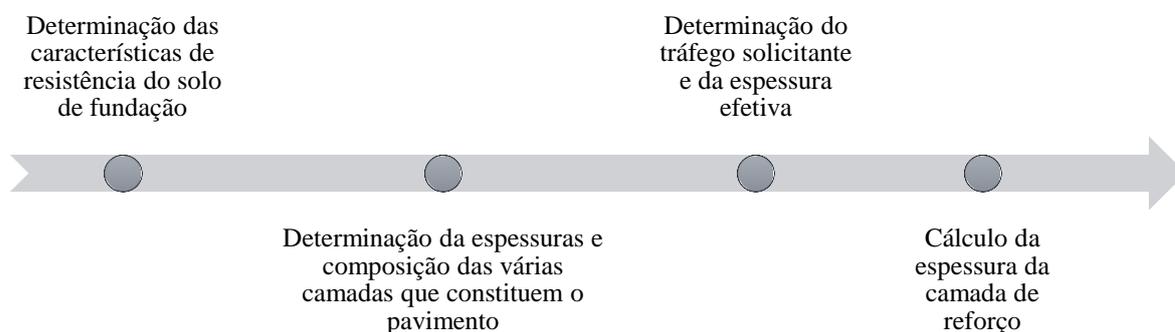


Figura 29: Fases do método baseado nas espessuras efetivas

4.6.2. Pré-dimensionamento do Reforço através do MACOPAV

Este método consiste num pré-dimensionamento de pavimentos rodoviários novos, porém também se adota para pré-dimensionar o reforço de pavimentos rodoviários existente.

O método depende da classe de tráfego e da classe da fundação. A forma de obtenção destas classes encontra-se nos subcapítulos 4.3.1. e 4.3.3., respetivamente.

Com base nas classes de fundação e de tráfego e, tendo em conta a constituição do pavimento em estudo, visto que influencia o pré-dimensionamento, determina-se a constituição do novo

pavimento. A título de exemplo, a Figura 30 representa a constituição de um pavimento flexível para a classe de fundação F_3 , com 20 cm em camada de base granular, para cada tipo de classe de tráfego.

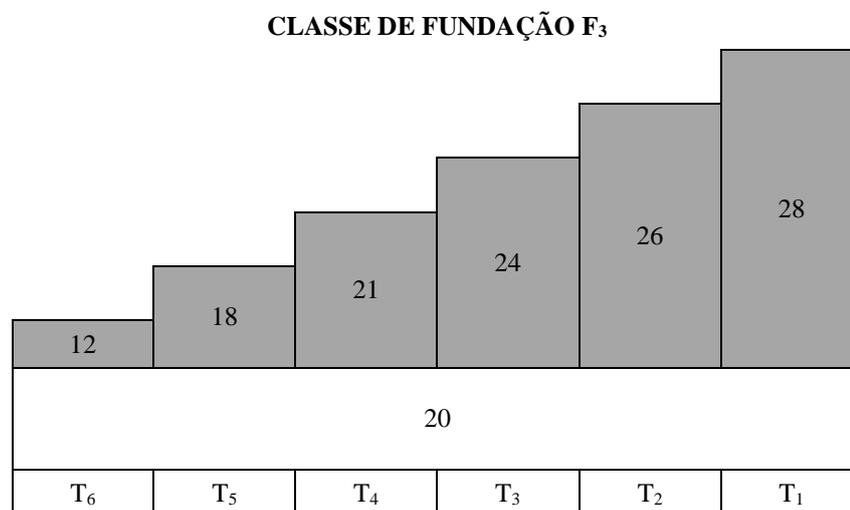


Figura 30: Espessura do pré-dimensionamento para o pavimento flexível com classe de fundação F_3 (EP-JAE, 1995)

As estruturas indicadas no MACOPAV apresentam camadas constituídas por material granular (em sub-base ou em sub-base e base), por isso, como para o pré-dimensionamento só se pode utilizar misturas betuminosas, converte-se o material granular em material betuminoso. Considera-se que cada 3 cm de ABGE equivalem a 1 cm de mistura betuminosa (Benta, 2012).

A espessura do reforço necessário é obtida através da subtração entre a espessura total de mistura betuminosa e a espessura efetiva, sendo esta determinada pelo mesmo procedimento, descrito anteriormente no método da *Asphalt Institute*.

4.6.3. Método Empírico-mecanicista

4.6.3.1. Modelo de Cálculo de Tensões e Extensões

Os modelos de cálculo do estado de tensão-deformação baseiam-se atualmente na teoria da elasticidade, admitindo comportamento linear para os materiais que constituem o pavimento, porém estes por vezes apresentam comportamento não-linear.

A análise baseada na teoria da elasticidade considera o pavimento e a fundação como um conjunto de várias camadas, onde cada camada tem uma espessura finita, à exceção da última (fundação), em que as propriedades de cada camada são homogéneas.

As camadas entre si podem ser consideradas com aderência perfeita ou sem aderência. Na maioria dos casos consideram-se com aderência perfeita e que têm uma dimensão infinita na direção transversal (Neves, 2001; Branco *et al.*, 2006).

O comportamento mecânico dos materiais das camadas (relação tensão-extensão) é caracterizado por duas constantes: o módulo de deformabilidade (E) e o coeficiente de *Poisson* (ν). Segundo Branco *et al.* (2006), a falta de adequação do modelo de comportamento linear para traduzir a realidade, já que por vezes os materiais apresentam comportamento não-linear, é superada fazendo a obtenção das constantes de caracterização mecânica, sobretudo o módulo de deformabilidade.

Existem alguns programas de cálculo automático que permitem calcular o estado de tensão-deformação, de acordo com as condições definidas anteriormente. O programa adotado para o caso de estudo foi o BISAR, desenvolvido pela Shell. A título de exemplo, existem outros, como o ELSYM5, desenvolvido na Universidade da Califórnia, o DAMA do *Asphalt Institute* e o VEROAD (Neves, 2010; Branco *et al.*, 2006).

5. TÉCNICAS DE CONSERVAÇÃO E REABILITAÇÃO DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS

5.1. Introdução

No reforço de pavimentos são regularmente utilizadas misturas betuminosas, sendo aplicado betão betuminoso em camada de desgaste e mistura betuminosa densa em camada de regularização. Contudo, devido às maiores exigências de qualidade, aos orçamentos disponíveis e à crescente preocupação ambiental, foram desenvolvidas novas técnicas de reabilitação de pavimentos rodoviários, que visam garantir as mesmas condições de segurança e conforto. Torna-se pois indispensável conhecer, em cada caso, quais as técnicas de reabilitação possíveis de serem utilizadas, assim como as vantagens que oferecem em relação às técnicas “tradicionais”.

As misturas betuminosas são as mais utilizadas na concepção de novos pavimentos e na reabilitação dos existentes. A granulometria adotada para determinada mistura, a forma e densidade dos agregados e o tipo e a quantidade de betume asseguram o atrito interno e a coesão da mistura betuminosa, que por sua vez garantem a estabilidade da estrutura.

As misturas betuminosas estão sujeitas a diversas ações que levam à desintegração da sua estrutura, de salientar as solicitações climáticas e do tráfego. No entanto, este tipo de pavimento possui elevada durabilidade, apresentando elevada resistência contra a desintegração. Normalmente, quanto maior for a quantidade de betume, maior será a durabilidade da mistura, reduzindo a quantidade e o tamanho dos vazios presentes na mistura, o que dificulta a entrada de ar e água, protegendo assim os agregados. A utilização de uma granulometria extensa, assim como uma boa compactação, aumentam a impermeabilidade da mistura, assim como a sua durabilidade.

Uma das características que mais se destaca neste tipo de pavimentos é a sua elevada flexibilidade, o que permite o ajuste aos diversos assentamentos diferenciais, sem que ocorra fendilhamento. A flexibilidade das misturas betuminosas depende essencialmente da percentagem de betume, ou seja, quanto maior for a percentagem de betume maior é a flexibilidade, embora a granulometria dos agregados também tenha influência.

A aderência entre o pavimento rodoviário e os pneus dos veículos é o fator mais importante para a segurança dos utentes. Esta característica depende da natureza do agregado usado, a rugosidade do pavimento é garantida pela aplicação de agregados com textura superficial rugosa e resistência ao desgaste provocado pela passagem dos rodados. O excesso de betume não é aconselhado, para que este não exsude, evitando uma superfície demasiada lisa.

As misturas betuminosas são de fácil manuseamento, garantindo a facilidade de espalhamento e de compactação. Estas particularidades resultam de uma correta formulação da mistura e do cumprimento das boas regras de aplicação (Branco *et al.*, 2006; Benta, 2012).

Neste capítulo será focado nas diversas técnicas de reabilitação, aplicáveis em pavimentos flexíveis.

5.2. Técnicas de Reabilitação das Características Superficiais

As técnicas de reabilitação das características superficiais dos pavimentos flexíveis aplicam-se ao nível da camada de desgaste, com o objetivo de implementar ou recuperar as características funcionais dos pavimentos.

Para além de garantir as características necessárias para assegurar o conforto e a segurança dos utentes, estas novas técnicas devem melhorar esses mesmos aspetos e garantir outros, como a impermeabilidade da camada de desgaste, a redução do ruído e a aderência pneu-pavimento (Vicente, 2006).

Este tipo de técnicas só devem ser aplicadas em pavimentos com boas condições estruturais, visto que não contribuem substancialmente para a resistência estrutural, apenas asseguram as características superficiais.

As principais técnicas de reabilitação das características superficiais são:

- Revestimentos betuminoso superficial;
- Microaglomerado betuminoso a frio;
- Lama asfáltica (*slurry seal*);
- Microbetão betuminoso rugoso;

- Argamassa betuminosa.

Quando o pavimento rodoviário está em boas condições, não sendo visível grande degradação superficial e apresenta uma boa capacidade estrutural, umas das técnicas aplicáveis é a do revestimento betuminoso superficial. Este tipo de revestimento é indicado para pavimentos com tráfego baixo, porém com o surgimento dos ligantes modificados podem também ser usados para tráfego elevado.

Quando esta técnica é executada corretamente proporciona uma superfície homogênea, com características antiderrapantes e com uma boa impermeabilização, prevenindo a degradação das camadas subjacentes. Tem a capacidade de acompanhar as deformações relativamente grandes, devido à sua alta flexibilidade.

Este tipo de revestimento é constituído por camadas de agregado e de ligante. As diferentes combinações possíveis destas camadas proporcionam vários tipos de revestimentos. As combinações entre os materiais (ligante betuminoso – L e agregado – A) estão representadas na Figura 31, em que:

- (1) Revestimento simples (LA);
- (2) Revestimento simples com dupla aplicação de agregado (LAa);
- (3) Revestimento simples com a aplicação prévia do agregado (ALa);
- (4) Revestimento duplo (LALa);
- (5) Revestimento duplo com aplicação prévia de agregado (ALALa);
- (6) Revestimento triplo (LALALa).

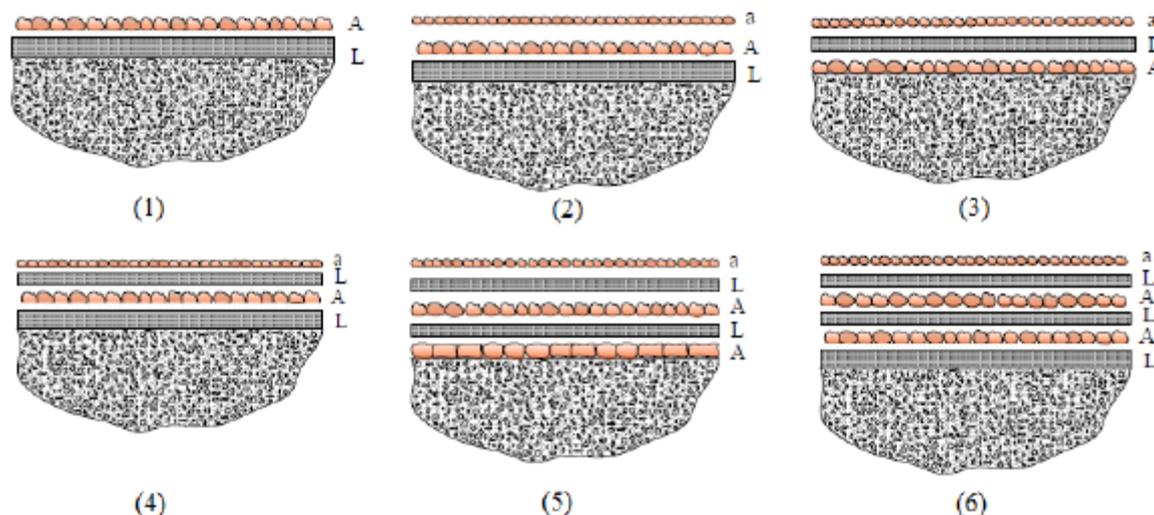


Figura 31: Os revestimentos betuminosos superficiais (Vicente, 2006)

A escolha do tipo de revestimento é fundamental para o sucesso da solução pretendida. Os revestimentos multicamadas e com agregados de maiores dimensões são mais duráveis e eficazes, embora com maiores custos.

O microaglomerado betuminoso a frio consiste numa mistura betuminosa a frio com emulsão betuminosa, realizada *in situ* e espalhado sobre o pavimento, em estado fluído, numa camada fina.

Pelo facto de ser uma técnica a frio e de ser capaz de assegurar boas características superficiais a custo baixo é uma técnica concorrente com as técnicas a quente, para além disso consegue uma boa aderência dos pneus e uma excelente impermeabilização (Branco *et al.*, 2006).

É uma técnica indicada para locais urbanos, devido à baixa espessura e porque origina baixo ruído em circulação. Pode ser também usada para selagem de juntas longitudinais e reparações localizadas do tipo desagregação da camada de desgaste, devido à sua reduzida espessura (Pereira & Miranda, 1999).

A lama asfáltica ou *Slurry seal* é uma técnica semelhante ao microaglomerado a frio, distingue-se deste pela menor dimensão dos agregados utilizados. A granulometria usada nesta técnica corresponde na realidade a uma grande percentagem de agregados de dimensões inferiores a 2 mm.

Esta técnica está a desaparecer em Portugal devido à sua baixa rugosidade, que diminui a aderência entre o pneu-pavimento, principalmente com o pavimento molhado. As grandes vantagens desta técnica residem na facilidade de espalhamento e no grande rendimento obtido.

O betão betuminoso rugoso oferece excelentes características em termos de conforto e segurança, assegurando uma boa regularidade e aderência elevada. Para além disso, é uma técnica durável e normalmente aplicada em estradas com tráfego elevado e rápido.

A razão pela qual esta técnica não é mais utilizada reside na baixa impermeabilidade, sendo por vezes, sujeita a uma sobredosagem da rega de colagem (Branco *et al.*, 2006; Benta, 2012).

A argamassa betuminosa é uma mistura a quente que, devido a sua constituição, uma mistura de agregado fino com ligante puro ou modificado, permite a reabilitação das características superficiais, nomeadamente o fendilhamento.

Por ser uma mistura com alguma deformabilidade permite a recuperação do estado superficial da camada de desgaste em situações de fendilhamento generalizado, retardando a intervenção de uma reabilitação estrutural (Pereira & Miranda, 1999).

5.3. Misturas Betuminosas Convencionais a Quente

5.3.1. Misturas Betuminosas a Quente

As misturas betuminosas são constituídas geralmente por um conjunto de materiais granulares. Numa central estes agregados são misturados com uma determinada quantidade de ligante. O ligante utilizado nestas misturas é o betume puro, proveniente da destilação do petróleo. Posteriormente a mistura é transportada, espalhada e compactada constituindo uma camada de pavimento.

As novas designações para as misturas betuminosas segundo a EN 13108-1 e uma comparação com a designação adotada no Caderno de Encargos de 1998 apresentam-se na Tabela 8. As novas designações europeias não são totalmente esclarecedoras, pois existem misturas betuminosas distintas com a mesma designação, pelo que foram adicionadas siglas correspondentes ao tipo de mistura em causa (Estradas de Portugal, 2012).

Tabela 8: Designação das misturas betuminosas (Estradas de Portugal, 2012)

Camada	Designação anterior	Designação atual
Base	Macadame Betuminoso Fuso B	AC 32 base ligante (MB)
	Macadame Betuminoso Fuso A	AC 20 base ligante (MB)
	Mistura Betuminosa de Alto Módulo	AC 20 base ligante (MBAM)
Ligação	Macadame Betuminoso Fuso A	AC 20 bin ligante (MB)
	Mistura Betuminosa Densa	AC 20 bin ligante (MBD)
	Mistura de Alto Módulo	AC 16 bin ligante (MBAM)
	Betão Betuminoso	AC 14 bin ligante (BB)
	Argamassa Betuminosa com betume modificado	AC 4 bin ligante (AB)
Regularização	Macadame Betuminoso Fuso A	AC 20 reg ligante (MB)
	Mistura Betuminosa Densa	AC 20 reg ligante (MBD)
	Betão Betuminoso	AC 14 reg ligante (BB)
	Argamassa com betume modificado	AC 4 reg ligante (AB)
Desgaste	Betão Betuminoso	AC 14 surf ligante (BB)
	Betão Betuminoso Rugoso	AC 14 surf ligante (BBr)
	(micro) Betão Betuminoso Rugoso	AC 10 surf ligante (mBBr)

AC - designação do produto, cujo termo em inglês é *Asphalt Concrete*;
 ligante - classe a definir;
 base - referente à camada de base, cujo termo em inglês é similar *base course*;
 bin - referente à camada de ligação, cujo termo em inglês é *binder course*, de espessura constante;
 reg - referente à camada de regularização, cujo termo em inglês é *regulating course*, de espessura variável;
 surf - referente à camada de desgaste, cujo termo em inglês é *surface course*.

A mistura betuminosa a quente é a solução mais adotada em Portugal para a reabilitação de pavimentos. As misturas que se enquadram nas misturas betuminosas a quente são o macadame betuminoso, a mistura betuminosa densa e o betão betuminoso em camada de desgaste ou subjacente a esta.

Na Tabela 9 são indicadas as características das diferentes misturas a quente.

Tabela 9: Características das misturas a quente (Santos, 2009)

Misturas a quente	Dimensão dos agregados	Percentagem de betume (%)	Porosidade (%)	VMA (%)
Betão betuminoso para camadas de desgaste (AC 14 ou AC 10)	Dimensão máxima de 10 mm ou de 14 mm	5-6	4-6	Não deve ser inferior a 14%
Macadame Betuminoso (AC 32 ou AC 20)	Dimensão máxima de 25 mm ou 40 mm	4-5	4-8	Não deve ser inferior a 13%
Mistura Betuminosa Densa (AC 20)	Dimensão máxima de 20mm	5-5,5	3-5	Não deve ser inferior a 13%

Para se atingir a consistência adequada do betume para o fabrico da mistura betuminosa é necessário aquecê-lo a temperaturas da ordem dos 150 a 160°C. Após a produção da mistura é necessário assegurar uma temperatura pré-determinada para se proceder ao espalhamento e compactação, temperatura esta na ordem dos 130 a 150°C (Batista, 2004).

Segundo Antunes (1993) as camadas betuminosas exibem módulos de deformabilidade no início da sua vida de serviço na ordem dos 4000 e 8000 MPa. Estes valores são meramente ilustrativos e em função das condições de serviço em Portugal, nomeadamente da temperatura e do tempo de carga.

5.3.2. Misturas Betuminosas de Alto Módulo

As misturas de alto módulo são idênticas às misturas betuminosas a quente, apenas diferenciam no betume utilizado. Nas misturas betuminosas a quente normalmente utilizam-se betumes com penetração nominal de 35/50 ou 50/70, já nas misturas de alto módulo recorre-se a betume mais duro, de penetração nominal na ordem dos 10/20. Com a introdução deste tipo de betume nas misturas betuminosas obtêm-se misturas betuminosas com maiores módulos de deformabilidade e, conseqüentemente, com melhor desempenho face às deformações permanentes.

O betume utilizado nas misturas betuminosas de alto módulo é mais viscoso que o betume utilizado nas misturas betuminosas convencionais, sendo necessário durante a produção atingir temperaturas compreendidas entre os 170 e 190°C. Para a realização do espalhamento e compactação também se exigem temperaturas superiores, na ordem dos 145 e 175°C (Batista, 2005).

A mistura betuminosa de alto módulo possui uma dosagem de betume geralmente superior a 5%. As granulometrias mais correntes são 0/10, 0/14 e 0/20 e a porosidade varia entre os 3 e 5% (Branco *et al.*, 2006).

Esta solução apresenta como principal desvantagem, ser necessário atingir temperaturas mais elevadas para a produção e colocação em obra e conseqüentemente maiores consumos de energia. Apresentam ainda problemas de compactação quando a mistura é aplicada em tempo frio.

Em pavimentos rodoviários em que existem condicionamentos de cotas, a aplicação da mistura betuminosa de alto módulo pode ser interessante. Na Figura 32 compara-se as diferenças entre as misturas betuminosas a quente e as misturas betuminosas de alto módulo, verifica-se que nas misturas betuminosas de alto módulo são necessárias menores espessuras para se obter o mesmo ou um melhor módulo de deformabilidade, em relação às misturas betuminosas a quente convencionais (Batista, 2005).

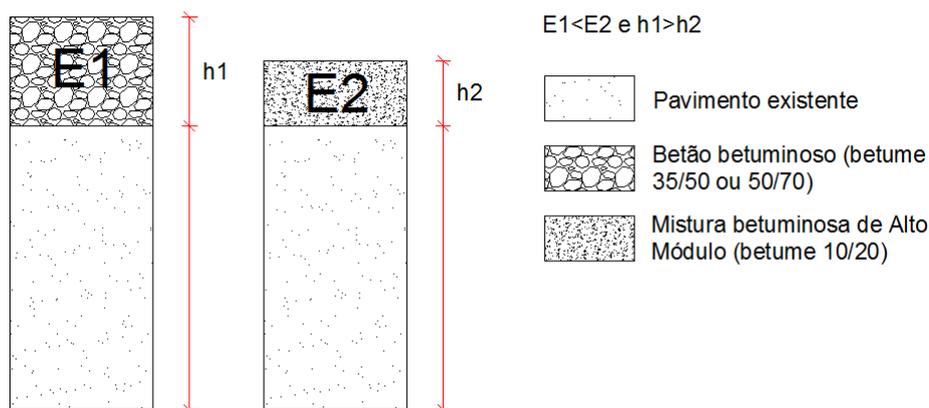


Figura 32: Esquema ilustrativo das diferenças entre as misturas betuminosas a quente tradicionais e as misturas betuminosas de alto módulo (Batista, 2005)

A redução da espessura da camada de reforço conduz a outras vantagens, como:

- Redução da utilização dos recursos naturais (agregados e betume);
- Redução dos volumes de transporte dos materiais e, conseqüentemente, redução dos custos de transporte;
- Redução dos tempos de execução da camada, e, por conseguinte, redução dos custos associados à execução da camada.

Segundo Batista (2004) estas camadas exibem módulos de deformabilidade no início da sua vida de serviço na ordem dos 10000 e 15000 MPa. Estes valores são meramente ilustrativos e em função das condições de serviço em Portugal, nomeadamente da temperatura e do tempo de carga.

5.4. Misturas Betuminosas com Betumes Modificados

As misturas betuminosas com betume modificado surgem para melhorar as características das misturas betuminosas convencionais, conferindo-lhes menor suscetibilidade térmica e maior

flexibilidade, traduzindo-se numa resposta mais eficaz às solicitações exercidas sobre os pavimentos e maior resistência ao envelhecimento durante a utilização (Branco *et al.*, 2006).

A aplicação de misturas betuminosas com betume modificado permite reduzir a frequência da manutenção, permitindo reduzir os custos destinados à manutenção.

De uma maneira simplificada, os betumes modificados não são mais do que uma mistura de betume com aditivos. Os aditivos conferem ao betume melhores propriedades e melhoram o desempenho do betume na mistura.

5.4.1. Misturas Betuminosas com Betume Modificado com Polímeros

Este tipo de misturas são produzidas com betumes modificados com polímeros, sendo geralmente aplicadas em camadas de desgaste.

Pretende-se com este tipo de mistura melhorar principalmente a elasticidade e a sensibilidade à temperatura, o que conduz ao aumento da resistência à fadiga, à redução da deformação permanente e à redução da propagação de fendas na mistura. As melhorias estão relacionadas com o tipo de polímero utilizado na mistura betuminosa (Batista, 2004).

Os polímeros mais utilizados para a modificação do betume são termoplásticos, que quando aquecidos se tornam maleáveis de forma reversível, sendo por isso possível serem moldados novamente. Os polímeros termoplásticos dividem-se em dois grupos: os elastómeros e os plastómeros. O SBS (estireno-butadieno-estireno), o SIS (estireno-isopreno-estireno), o SB (estireno-butadieno) e o SBR (co-polímero) são exemplos de polímeros elastoméricos termoplásticos, enquanto o EVA (etileno-vinil-acetato), o EMA (etileno-metilo-acrilato), o EBA (etileno-butilo-acrilato) e o PIB (polisobutileno) são polímeros do tipo plastoméricos termoplásticos (Azevedo, 2012).

A adição destes polímeros ao betume traduz-se num aumento da sua viscosidade, na diminuição da penetração, no aumento da temperatura de amolecimento, na melhoria da resistência ao envelhecimento e das propriedades de adesividade.

Este tipo de mistura possui maior viscosidade, sendo necessário atingir temperaturas na ordem dos 160-180°C durante o fabrico da mistura e temperaturas na ordem dos 140-160°C para se

proceder à compactação. É conveniente não exceder os 190°C, por forma a minimizar a oxidação do betume e evitar a degradação do polímero (Batista, 2005).

A modificação do betume com polímeros é realizada em fábrica, sendo o betume modificado fornecido ao fabricante da mistura betuminosa. Logo, o processo de fabrico da mistura betuminosa é idêntico ao processo de fabrico de uma mistura betuminosa convencional, tendo que ser apenas resguardado que a cisterna de armazenamento do ligante está equipada com um sistema de agitação adequado para manter a homogeneidade da mistura.

A componente mais importante na modificação do betume com polímeros é a razão betume/polímero, visto condicionar as propriedades finais e também o preço do produto, na medida em que o preço dos polímeros é superior ao preço do betume.

Segundo o caderno de encargos da Estradas de Portugal referente ao ano 2012, o betume modificado é possível empregar, pelo menos, em misturas betuminosas drenantes, e misturas betuminosas rugosas, devendo o projeto indicar o tipo de betume a utilizar (Estradas de Portugal, 2012).

A aplicação de misturas betuminosas drenantes com betumes modificados em camadas de desgaste proporcionam uma melhoria significativa das condições de circulação em tempo de chuva e ainda a diminuição do ruído de rolamento. Contudo, devido à passagem do tráfego e sob as ações atmosféricas, verifica-se a colmatação dos poros. Com o passar do tempo este pavimento poderá apresentar características semelhantes às de uma mistura rugosa.

As misturas betuminosas com PMB apresentam módulos de deformabilidade na ordem dos 4000 MPa e os 9000 MPa.

A percentagem de betume do betão betuminoso drenante e das misturas rugosas apresentam valores similares, compreendidos na ordem dos 4 a 6%. Já no que diz respeito à porosidade, os valores são muito distintos, sendo que o betão betuminoso drenante apresenta valores compreendidos entre 22 e 30%, enquanto as misturas betuminosas rugosas apresentam valores na ordem dos 3 a 6% (Batista, 2004; Branco *et al.*, 2006).

No geral, as misturas betuminosas com PMB apresentam:

- Melhores características funcionais, através de uma melhoria da rugosidade e da aderência;

- Maior durabilidade e flexibilidade;
- Menos suscetibilidade térmica;
- Melhor comportamento à fadiga e/ou às deformações permanentes.

5.4.2. Misturas Betuminosas com Betume Modificado com Borracha

As misturas betuminosas com betume modificado com borracha (BMB) consistem em misturas em que o betume é modificado com borracha, proveniente de pneus usados.

O betume é previamente modificado com a borracha reciclada de pneus, via húmida, antes deste se misturar com os agregados. Este processo pode ser realizado em fábrica ou numa unidade de produção localizada na central de fabrico da mistura betuminosa, sendo este último processo o mais recorrente em Portugal (Batista, 2005).

Segundo Azevedo (2012) os betumes modificados com borracha de pneus podem ser de três tipos:

- De baixa percentagem de granulado de borracha (BBB) – resulta num betume de baixa viscosidade (inferior a 10% em relação à massa total do ligante);
- De média percentagem de granulado de borracha (BBM) – resulta num betume de média viscosidade (10 a 15% em relação à massa total do ligante);
- De alta percentagem de granulado de borracha (BBA) – resulta num betume de alta viscosidade (superior a 18% em relação à massa total de ligante).

O betume modificado de borracha de baixa e média percentagem é produzido em fábrica, já o betume de alta percentagem de granulado é produzido *in situ*, no estaleiro, na altura de fabrico das misturas betuminosas, por este não ser estável ao armazenamento (Estradas de Portugal, 2012).

As principais características que as misturas betuminosas adquirem com a incorporação de borracha são: um ligante betuminoso com excelentes propriedades elastómeras; alta viscosidade a altas temperaturas e muito boa flexibilidade a baixas temperaturas.

As misturas betuminosas com betume modificado com borracha resistem melhor à fadiga e à propagação de fissuras e permitem a diminuição da espessura total de reforço do pavimento. A redução da camada de reforço proporciona algumas vantagens, estas vantagens são as mesmas que foram mencionadas para as misturas betuminosas de alto módulo (subcapítulo 5.3.2.).

Em relação à resistência da deformação permanente, as misturas betuminosas, mesmo com elevadas incorporações de BMB, apresentam valores inferiores aos admitidos para as zonas mais quentes e com maior tráfego pesado. As características do BMB são a principal causa, sobretudo a sua elevada viscosidade, muito superior face a um betume modificado convencional.

A utilização de BMB em camada de desgaste contribui para melhorar a resistência ao envelhecimento, assim como as características superficiais, aumentando a durabilidade do pavimento. Contribui também para a redução do impacte ambiental, através da diminuição do ruído de rolamento (Batista, 2005).

Para além das vantagens que a borracha proveniente dos pneus introduz nas misturas betuminosas, permite a utilização de um resíduo, dando uma nova utilização ao material, em vez da sua acumulação em depósitos ou incineração.

Normalmente o betume modificado com borracha aplica-se em dois tipos de misturas, em mistura betuminosa rugosa (MBR-BMB) e em mistura betuminosa aberta (MBA-BMB). Sendo a primeira mistura aplicada em camadas de base, de regularização ou de desgaste e a segunda aplicada apenas em camadas de desgaste.

Na Tabela 10 resumem-se as principais características das misturas MBR-BMB e MBA-BMB.

Tabela 10: Características das misturas MBR-BMB e MBA-BMB (Antunes *et al.*, 2006)

Mistura	Dimensão máxima do agregado (mm)	Ligante	Percentagem de BMB relativa à massa total da mistura (%)	Porosidade da mistura (%)
MBR-BMB	12,5	BMB com 20 a 22% de borracha	8-9	4,5-6,5
MBA-BMB	10	BMB com 20 a 22% de borracha	9,5-10,5	10-15

A mistura MBR-BMB exhibe módulos de deformabilidade compreendidos entre 3000 e 4500 MPa para betumes base 35/50, e 2500 a 3500 MPa para betumes base 50/70. Enquanto a mistura

MBA-BMB apresenta módulos de deformabilidade na ordem 1500 e 2500 MPa para betumes de base 35/50, e 1000 e 2000 MPa para betumes base 50/70.

O BMB para além da sua utilização em misturas betuminosas, também pode ser empregue em camadas selantes, consiste numa camada delgada com betume modificado aplicada sobre a superfície de um pavimento betuminoso envelhecido. Este procedimento tem como objetivo reduzir a propagação das fendas (Antunes *et al.*, 2006).

5.4.3. Misturas Betuminosas com Borracha

Nas misturas betuminosas com borracha, a borracha é adicionada juntamente com os agregados, este processo é designado por via seca. Esta mistura é idêntica à mistura betuminosa com BMB quanto à sua constituição, pois ambas são constituídas por borracha reciclada.

As partículas de borracha são inicialmente adicionadas aos agregados pré-aquecidos, antes do betume ser adicionado. O betume é aquecido a temperaturas entre 140 e 160 °C e adicionado à mistura constituída por borracha-agregado (Visser & Verhaeghe, 2000).

As dimensões das partículas de borracha neste processo de fabrico são normalmente superiores, em relação à dimensão das partículas de borracha utilizadas para o BMB. Sendo que as partículas de borracha neste tipo de mistura betuminosa substituem em parte o agregado mineral.

5.5. Misturas Betuminosas Recicladas

5.5.1. Considerações Iniciais

Os tempos de hoje exigem cuidados especiais para com o Ambiente e com a utilização de matérias-primas. A reciclagem de pavimentos rodoviários flexíveis tem como objetivo reduzir o impacto ambiental e diminuir a utilização de novos recursos (agregados e ligante). Pelo facto de as misturas fresadas serem recuperadas para novas misturas, não é necessário criar vazadouros para a sua deposição, diminuindo deste modo a produção de resíduos. A reciclagem de pavimentos rodoviários consiste na utilização de materiais fresados de pavimentos antigos com a adição de novos materiais, reduzindo consideravelmente a quantidade de matéria-prima nova.

A reciclagem de pavimentos rodoviários é uma técnica destinada à reabilitação das características superficiais, estruturais ou de ambas.

A reciclagem destinada à reabilitação das características superficiais é normalmente usada em pavimentos que apresentam um nível considerável de fendilhamento na superfície. Esta técnica permite eliminar o fendilhamento existente e criar as características necessárias para a comodidade e segurança dos utilizadores. A reciclagem também é utilizada para repor as características estruturais dos pavimentos (quer das camadas betuminosas, quer das camadas granulares).

Esta técnica assume de dia para dia maior importância, devido às restrições do âmbito ambiental a que as empresas estão sujeitas. Do ponto de vista económico também é vantajoso, visto que a utilização de novos materiais é menor, porém os equipamentos e as técnicas de construção ainda não são as melhores. Tem havido uma grande aposta na reciclagem de pavimentos, aumentando a sua aplicação (Branco *et al.*, 2006).

A reciclagem consiste na transformação de um pavimento com elevado grau de degradação, num pavimento homogéneo e adequado às exigências de serviço. A utilização desta técnica permite aumentar a durabilidade do pavimento, melhorar a sua impermeabilidade e proteger as camadas inferiores do pavimento.

Em Portugal já foram realizadas algumas experiências recorrendo à abordagem da técnica de reciclagem *in situ* a frio, com recurso a emulsões de betume. Enquanto a técnica de reciclagem *in situ* a quente ainda não teve um grande sucesso, devido ao elevado custo e a ser uma técnica altamente poluidora (Branco *et al.*, 2006).

Segundo o Caderno de Encargos (2012) as metodologias de reciclagem aplicadas em Portugal são seguintes:

- Mistura reciclada *in situ* a frio
 - Com cimento
 - Com emulsão betuminosa
- Mistura reciclada a quente em central
- Mistura reciclada semi-quente em central

Existem ainda outras técnicas de reciclagem, estando estas sujeitas a aprovação pelas entidades responsáveis (Estradas de Portugal, 2012). Na Tabela 11 estão referidas todas as técnicas de reciclagem atualmente conhecidas.

Tabela 11: Principais técnicas de reciclagem (Santos, 2009)

Tipo de Reciclagem	Local de Mistura	
	<i>In situ</i>	Central
Reciclagem a quente	x	x
Reciclagem semi-quente	-	x
Reciclagem a frio com cimento	x	-
Reciclagem com betume-espuma	x	x
Reciclagem com emulsão betuminosa	x	x

Seguidamente serão descritas algumas técnicas de reciclagem de materiais fresados de pavimentos flexíveis, que têm vindo a ser utilizadas no nosso país, assim como outras técnicas não tão frequentes.

5.5.2. Técnicas de Reciclagem a Frio *in situ*

A reciclagem a frio é uma técnica que consiste em fresar o pavimento existente e reutilizar o material fragmentado para fabricar uma nova mistura betuminosa a frio. Esta nova mistura pode ser realizada em central ou *in situ*.

Os ligantes hidráulicos e os hidrocarbonatos (betume-espuma e emulsão betuminosa) são adicionados aos materiais provenientes da fresagem, de forma a permitir um aumento da aglutinação da mistura.

Quando o processo da nova mistura se realiza sem o auxílio de energia para o aquecimento de novos materiais, esta técnica é designada por reciclagem a frio.

Estas técnicas de reciclagem a frio apresentam claras vantagens a nível económico e ambiental, o processo não exige elevados consumos energéticos e permite um aproveitamento significativo dos materiais dos pavimentos, nomeadamente quando o processo é realizado *in situ*.

De seguida são mencionados as diversas técnicas de reciclagem a frio.

5.5.2.1. Reciclagem a Frio *in situ*, com Cimento

Segundo o caderno de encargos da EP (EP, 2012) esta técnica consiste no rejuvenescimento/reforço do pavimento existente, em que se utiliza na totalidade ou parcialmente os materiais resultantes da fresagem. Os materiais das misturas betuminosas e das misturas granulares após o processo de fresagem são misturados com cimento, água e eventualmente com aditivos e agregado, a adição de agregados normalmente serve para corrigir a composição granulométrica da mistura. Esta técnica é mais aconselhável para aplicação em camadas de materiais granulares, visto que a presença de materiais reciclados de misturas betuminosas provoca uma ligeira diminuição da resistência da mistura.

Como anteriormente foi descrito, esta técnica é mais adequada para pavimentos com elevada espessura de material granular, em que a aplicação da técnica reciclagem *in situ* a frio com cimento poderá constituir um processo económico. O resultado final é do tipo agregado de granulometria extensa tratado com cimento (AGEC), este tipo de mistura apresenta uma resistência bastante elevada comparativamente às camadas existentes no pavimento antigo (Branco *et al.*, 2006).

A reciclagem a frio *in situ* com cimento requer camadas com espessuras na ordem dos 20 a 30 cm, podendo ser aplicadas espessuras inferiores desde que convenientemente justificadas.

O pavimento antigo anteriormente do tipo flexível passa a ser do tipo semirrígido, a camada tratada do tipo semirrígida passa a possuir a propensão ao fenómeno de retração. O tipo de cimento e classe de resistência do cimento influência na ocorrência de fendas de retração, sendo recomendado o uso de cimentos com classes de resistências baixas e cimentos com início de presa superiores a duas horas.

Sempre que a temperatura ambiente seja superior a 30°C é obrigatória a utilização de aditivos retardadores de presa, com o objetivo de retardar o início de presa do ligante. Por vezes são adicionados outros tipos de aditivos com vista à obtenção de uma melhor trabalhabilidade, impondo outras características à mistura (Estradas de Portugal, 2012).

Na Figura 33 está representado o procedimento da execução da reciclagem a frio *in situ* com cimento. Numa primeira fase ocorre a desagregação do pavimento existente e a adição de ligante e água, posteriormente a mistura reciclada a frio é sujeita à compactação para de seguida ser aplicado sobre esta uma camada de mistura betuminosa.

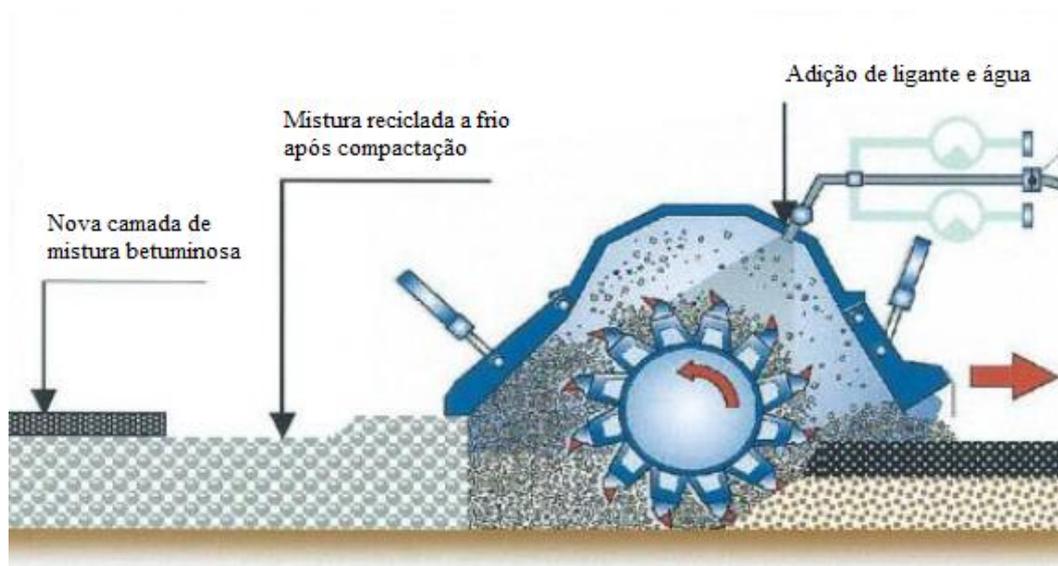


Figura 33: Procedimento da reciclagem a frio *in situ* com cimento (traduzido e adaptado de Wirtgen, 2001)

A adição do cimento aos agregados provenientes da fresagem poderá ser efetuada por duas formas:

- A seco, em que se adiciona ao material fresado, o cimento e a água por separado;
- Por via húmida, em que se junta previamente o cimento e a água, formando uma calda, sendo a calda injetada ao material fresado.

O material fresado deve cumprir os requisitos apresentados na Tabela 12 e estar isento de matéria orgânica e de outros produtos que possam comprometer a presa do cimento.

Tabela 12: Requisitos/propriedades do material fresado (Estradas de Portugal, 2012)

Propriedades	Valores
Limite de liquidez	< 35
Índice de Plasticidade	≤ 15
Dimensão máxima	< 80 mm
Percentagem de material passada no peneiro 4 mm	> 30%

Como as características da mistura dependem dos materiais constituintes das camadas a reciclar, deve-se ajustar a dosagem de cimento em função da resistência pretendida. Sendo que os valores mínimos a respeitar na formulação da mistura segundo o caderno de encargos são: dosagem de cimento superior a 3% e a resistência à compressão simples aos 7 dias superior a 2,5 MPa. Os provetes que serão sujeitos à compressão simples deverão ser executados segundo a NLT 310 e o ensaio de compressão simples de acordo com a NLT 305. Os provetes deverão

ser moldados para 97% de compactação em relação ao ensaio Proctor modificado, devendo-se esta exigência ao facto de este ser o nível de compactação mínimo em obra (Estradas de Portugal, 2012).

As camadas recicladas com cimento têm a vantagem de apresentarem maiores resistências à compressão, maiores módulos de deformabilidade, resultando numa maior capacidade de suporte da estrutura. Porém, como este tipo de técnica confere camadas mais rígidas, logo mais propícias ao aparecimento de fendilhamento por fadiga. Mesmo durante a execução da camada, deve existir um controlo do fendilhamento por retração, devido à libertação do calor de hidratação que ocorre durante a cura (Batista, 2004).

A camada resultante deste processo apresenta propensão para o aparecimento de fendas de retração. Por esta razão, a camada de desgaste aplicada além das suas funções estruturais deverá possuir capacidade para resistir à atividade das fendas de retração, sendo aconselhado a utilização de betão betuminoso modificado com borracha em camada de desgaste (Benta, 2012).

5.5.2.2. Reciclagem a Frio *in situ*, com Emulsão Betuminosa

Esta técnica é idêntica à anterior, diferenciando-se apenas no ligante utilizado, sendo neste caso utilizado a emulsão betuminosa.

Trata-se de uma mistura betuminosa a frio utilizando os materiais fresados do pavimento existente, aos quais se adiciona emulsão betuminosa e água. Tal como na técnica de reciclagem a frio *in situ* com cimento pode-se adicionar materiais corretivos, tais como, cimento e cal, por forma a se obter as características desejadas.

A reciclagem a frio *in situ* com emulsão betuminosa apresenta algumas desvantagens em relação à técnica referida anteriormente. A emulsão betuminosa é mais cara que o cimento tornando o processo mais caro e apresenta uma maior sensibilidade às condições meteorológicas, sendo desaconselhável utilizar este processo em zonas em geral muito húmidas (Marques, 1999; Branco *et al.*, 2006).

Na reciclagem *in situ* com emulsão recomenda-se a utilização de camadas betuminosas completas.

Segundo o Caderno de Encargos (2012) as espessuras recomendadas das camadas tratadas com esta técnica é da ordem dos 6 a 12 cm, podendo ser superiores desde que devidamente justificadas.

O processo construtivo desta técnica engloba de uma forma genérica as seguintes etapas:

- Espalhamento de material corretivo, caso este seja necessário;
- Passagem da máquina recicladora juntamente com as cisternas de água e de emulsão betuminosa;
- Compactação da mistura.

Na Figura 34 está representado esquematicamente a etapa da passagem da máquina recicladora. Numa primeira fase ocorre a desagregação do pavimento existente por fresagem com adição contínua de ligante betuminoso e, eventualmente, água. Caso esteja estabelecido a introdução de materiais corretivos é feita durante esta etapa. Por fim, o espalhamento da mistura resultante do processo anterior e, seguidamente, a sua compactação.

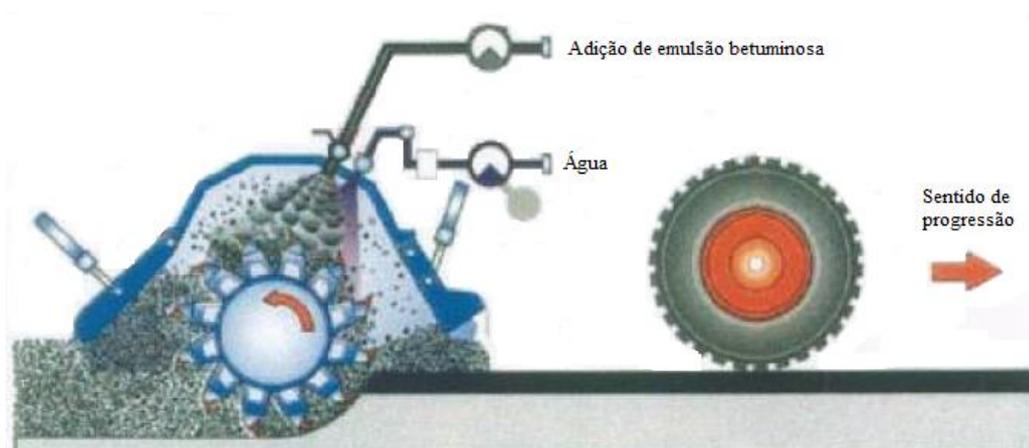


Figura 34: Procedimento da reciclagem a frio *in situ* com emulsão betuminosa (traduzido e adaptado de Wirtgen, 2001)

De acordo com o Caderno de Encargos (2012) a mistura reciclada com emulsão betuminosa deve cumprir os requisitos apresentados na Tabela 13.

Tabela 13: Requisitos mínimos para a mistura reciclada com emulsão

Requisitos	Resultados
Granulometria	Fuso I ou Fuso II
Percentagem de betume residual	< 1,5%
Resistência à compressão simples a seco	> 2,5 ou > 3 MPa
Resistência à compressão simples após imersão	> 2 ou > 2,5 MPa
Resistência Conservada	> 70% ou > 75%

A granulometria deve enquadrar-se num dos fusos mencionados na Tabela 14, tendo em conta que em princípio o fuso I é mais recomendável para camadas com espessuras superiores a 10 cm e o fuso II é mais recomendável para camadas com espessuras na ordem dos 6 a 10 cm.

A moldagem dos provetes deverá ser realizada de acordo com a norma NLT-161, com uma cura de três dias a cinquenta graus (50°C).

Os ensaios de compressão simples deverão ser realizados de acordo com a norma NLT-162, e terem em conta o tipo de tráfego, sendo recomendado a adoção de valores mais elevados para situações de tráfego mais exigente. (Estradas de Portugal, 2012).

Tabela 14: Fusos granulométricos para o material betuminoso recuperado

Dimensão dos peneiros (mm)	Percentagem de material passado (%)	
	Fuso I	Fuso II
40	100	-
32	90 - 100	100
20	69 - 95	80 - 100
12,5	52 - 82	62 - 89
8	40 - 70	49 - 77
4	25 - 53	31 - 58
2	15 - 40	19 - 42
0,500	2 - 20	2 - 20
0,250	0 - 10	0 - 10
0,063	0 - 3	0 - 3

A economia de materiais e de energia (técnica a frio), o desaparecimento de fendas impedindo a sua propagação e a manutenção da cota do antigo pavimento são algumas das vantagens da aplicação desta técnica.

A aplicação desta técnica requer estudos experimentais, de modo a perceber se à necessidade de adicionar alguma fração granulométrica em falta, assim como determinação, de modo preciso, da percentagem de betume residual a utilizar. Sendo necessário adicionar material granular, este é espalhado sobre o pavimento antes da passagem do equipamento de reciclagem.

A reciclagem com emulsão betuminosa, quando bem executada, assemelha-se a um material de granulometria extensa tratado com emulsão, apresentando melhores características estruturais em relação ao pavimento existente (Branco *et al.*, 2006).

5.5.2.3. Reciclagem a Frio *in situ*, com Betume-espuma

Esta técnica de reabilitação é idêntica às anteriores, diferindo no ligante utilizado. Neste processo utiliza-se o betume-espuma. Na Figura 35 está representado esquematicamente o processo de obtenção do betume-espuma. Este produto é produzido através da adição de pequenas quantidades de água, geralmente da ordem de 2 a 3% da massa de betume, ao betume quente (temperatura entre os 160 e 180°C). Quando o betume entra em contacto com a água forma-se uma espuma, cujo volume pode ser 20 a 30 vezes superior ao volume inicial do betume. Este processo reduz a sua viscosidade e aumenta a superfície específica do betume (Batista, 2005).

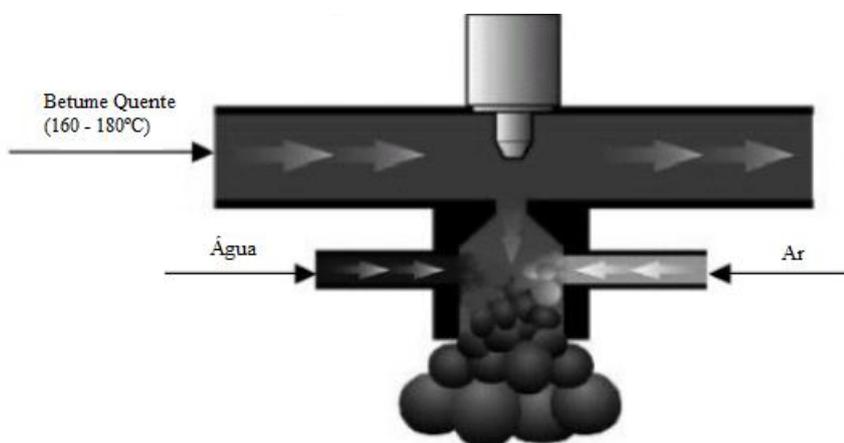


Figura 35: Processo de obtenção do betume espuma (traduzido e adaptado de Wirtgen, 2001)

O betume espuma é um produto formado por água, betume e ar, que ao fim de uns segundos tem tendência para voltar ao estado inicial.

Este tipo de reciclagem pode ser aplicada tanto a materiais betuminosos como a materiais granulares reciclados, em que melhora a resistência ao corte e a suscetibilidade.

Na Figura 36 apresenta-se um esquema do processo desta técnica, que consiste na fresagem e mistura do material reciclado com o ligante.

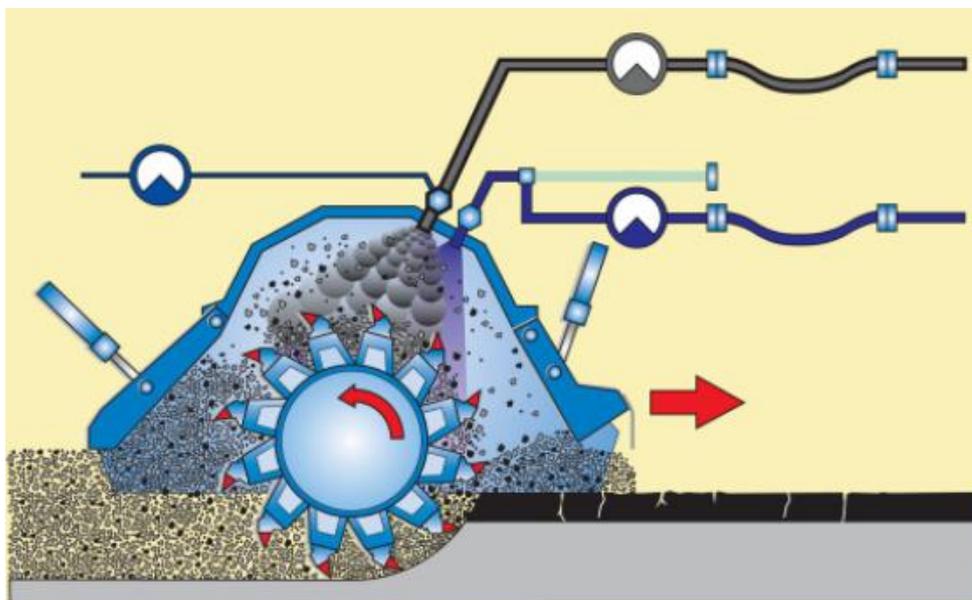


Figura 36: Procedimento da reciclagem a frio *in situ* com betume-espuma (Wirtgen, 2012)

Apesar do aquecimento necessário à produção da espuma de betume, este processo é considerado a frio porque a mistura dos diversos componentes, a sua aplicação e a compactação da mistura são efetuados à temperatura ambiente.

Segundo Teixeira *et al.* (2003), através da reciclagem por este método consegue-se um ganho considerável nos prazos de execução e na economia de matérias-primas.

5.5.3. Técnicas de Reciclagem a Quente *in situ*

Esta técnica de reciclagem difere das anteriores quanto à temperatura de execução, tipo de ligante e equipamento de reciclagem.

Existem dois processos desta técnica:

- A termorreperfilagem – consiste no aquecimento do pavimento seguido da sua compactação, permitindo selar as fendas existentes e repor a regularidade longitudinal do pavimento. A termorreperfilagem não permite a adição de novos materiais.

- A termorregeneração – consiste no aquecimento das camadas betuminosas, a sua escarificação, recomposição, nivelamento e compactação em nova camada.

Normalmente após a camada reciclada através do processo termorregeneração, é aplicada uma mistura nova com características de camada de desgaste.

Esta técnica é aplicada apenas a pavimentos flexíveis, sendo mais apropriada para resolver problemas funcionais. A profundidade de reciclagem não deve exceder os 8 cm, pois a adoção de profundidades superiores requer um aquecimento excessivo do pavimento (Moreira, 2005).

O ligante normalmente utilizado é um rejuvenescedor, podendo também ser aplicado com misturas novas.

O processo de reciclagem é iniciado pelos pré-aquecedores, sendo seguidos por um aquecedor-fresador, o qual escarifica o pavimento existente. O equipamento aquecedor-misturador procede em contínuo à mistura uniforme do material. A mistura é espalhada a partir da pavimentadora e compactada através de cilindros de pneus e de rolos (Branco *et al.*, 2006).

Esta técnica tem algumas vantagens, de salientar o facto de o processo ser rápido, reduzindo o tempo de intervenção na estrada e, conseqüentemente, a reposição rápida do tráfego. Permite ainda um melhor aproveitamento da capacidade aglutinante do betume.

As suas desvantagens estão relacionadas com o custo elevado, em comparação com outras técnicas concorrentes, devido sobretudo à energia necessária para manter o pavimento quente e ao tipo de equipamento utilizado. O processo produtivo resulta num nível considerável de poluição. Por vezes a aplicação desta técnica fica limitada devido ao facto de existirem obstáculos no pavimento, dificultando ou impedindo a sua realização (Branco *et al.*, 2006; Moreira, 2005).

Na Figura 37 está representada uma central contínua móvel, que consiste noutro processo de reciclagem *in situ* a quente. O tambor secador misturador tradicional está montado sobre um chassis rolante, e a este está ligada uma pavimentadora. O pavimento existente é fresado e colocado numa linha de fabrico, onde, se necessário, são adicionados os agregados novos.

O material colocado na linha de fabrico é transferido para o tambor secador misturador por um tapete elevador. No tambor efetuam-se as operações normais, de aquecimento, de mistura e de adição de betume, após este processo a mistura betuminosa está pronta e é transportada para a

pavimentadora. A fase final consiste no espalhamento e compactação, as operações tradicionais de pavimentação das camadas superiores (David, 2006).

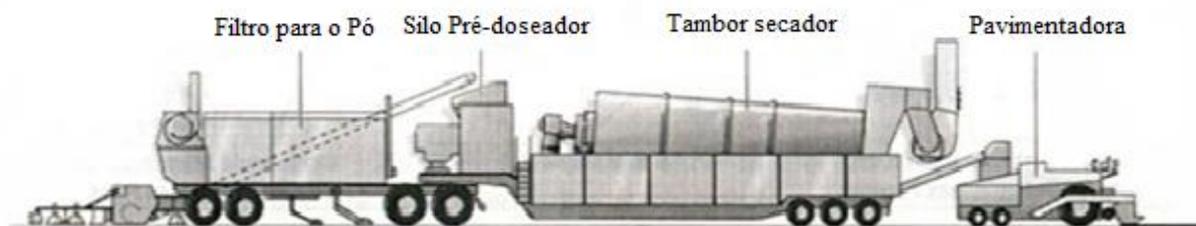


Figura 37: Central móvel para reciclagem de misturas betuminosas (David, 2006)

5.5.4. Técnicas de Reciclagem a Frio em Central

A reciclagem a frio em central é realizada em centrais que recebem o material fresado, posteriormente este material é misturado com emulsão betuminosa ou com betume-espuma.

A sequência das operações envolvidas neste processo são a fresagem do pavimento existente, o transporte do material proveniente da fresagem para a central, o fabrico do novo material betuminoso e o respetivo transporte do novo material para o pavimento em reabilitação.

A diferença entre o fabrico de reciclagem a frio em central ou *in situ* reside no facto da qualidade ter maior controlo em central, por outro lado esta técnica é mais dispendiosa, pois é necessário ter em conta os custos acrescidos devido ao transporte do material (Branco *et al.*, 2006).

5.5.5. Técnicas de Reciclagem a Quente em Central

A reciclagem a quente em central com betume consiste em produzir uma mistura betuminosa a quente, utilizando os materiais fresados das camadas betuminosas existentes (Figura 38). A qualidade desta mistura deve ser comparada às misturas realizadas com materiais novos.

A reciclagem em central envolve a fresagem, o transporte e o armazenamento dos materiais provenientes da fresagem, para posteriormente se iniciar a produção a quente de misturas betuminosas.



Figura 38: Esquema do processo de reciclagem a quente em central (Baptista, 2006)

As centrais de fabrico são as mesmas que as utilizadas para o fabrico das misturas betuminosas a quente convencionais, com algumas modificações, por forma a adaptá-las para o processo de reciclagem a quente em central.

As centrais de produção a quente de misturas betuminosas encontram-se divididas em centrais contínuas e centrais descontínuas. Nas centrais contínuas, normalmente a secagem e aquecimento dos agregados ocorre no mesmo tambor (tambor secador-misturador), enquanto, que nas centrais descontínuas os agregados passam primeiro pelo tambor secador e depois são encaminhados para o misturador.

Nas centrais contínuas nem todo o material proveniente do pavimento é reutilizado, normalmente é incorporado entre 10 a 70% de material a reciclar, em que as percentagens utilizadas variam em função do processo adotado para o aquecimento dos materiais fresados.

As taxas de reciclagem, sem pré-aquecimento do material fresado, não ultrapassam geralmente os 35/40%, enquanto com o recurso ao pré-aquecimento a 90°C do material fresado, pode-se atingir taxas de reciclagem de 65/70% para processos de produção correntes (Branco *et al.*, 2006).

5.6. Técnicas de Anti-reflexão de Fendas

Se o fendilhamento existente nas camadas antigas estiver num estado severo, com a existência de fendas ativas, em que os bordos das fendas se movimentam e, os movimentos na vertical são os mais prejudiciais, ocorre propagação de fendas às camadas superiores.

A reflexão de fendas é essencialmente originada pela repetição de cargas impostas pela passagem dos veículos, ciclos de contrações térmicas ou pela combinação destes dois fatores. Os movimentos das fendas provocados pela passagem de veículos, sobretudo de pesados, conduzem ao desenvolvimento de esforços de corte nas camadas novas, as camadas de reforço.

A reflexão de fendas consiste na propagação de fendas entre a camada existente e a camada nova. Quando a base do reforço atinge valores de tensão superiores aos admissíveis, inicia-se a propagação de fendas. Normalmente as fendas que surgem na camada de reforço são o “espelho” das fendas da camada existente, por estas serem idênticas às fendas existentes no pavimento antigo (Branco *et al.*, 2006).

O surgimento de fendas à superfície tem consequências que afetam a resistência e a durabilidade do pavimento, contribuindo significativamente para a sua ruína estrutural. Algumas das consequências provenientes do aparecimento de fendas são referenciadas de seguida (Quaresma, 1992):

- As fendas superficiais permitem a infiltração de água para o interior do pavimento, e, se a água atingir o solo de fundação, este perderá coesão aumentando as deformações permanentes do pavimento;
- O nível de tensão instalado nas camadas subjacentes às camadas fendilhadas é maior, devido à menor repartição das tensões provocadas pelos rodados dos veículos;
- A combinação das ações atmosféricas e dos esforços provocados pelos rodados dos veículos aumentam a probabilidade do aparecimento de degradações.

Para eliminar ou limitar este mecanismo torna-se necessário aplicar medidas destinadas a eliminar a origem da causa, ou que condicionem ou eliminem a propagação (Figura 39). Na primeira abordagem recorre-se à fresagem das camadas fendilhadas, para reposição de novas camadas betuminosas. O material fresado pode também ser reciclado para posterior colocação em obra, com a adição de novo betume e, se necessário, com a devida correção da granulometria (Benta, 2012).

Na segunda abordagem destacam-se os métodos:

- Camadas de pequena espessura de argamassa betuminosa com betume modificado (SAMI – Stress Absorbing Membrane Interlayer);
- Uso de camadas de reforço mais espessas;
- Uso de misturas mais resistentes à propagação de fendas (Por exemplo: betão modificado com borracha);
- Grelhas;
- Armaduras;
- Geotêxteis.

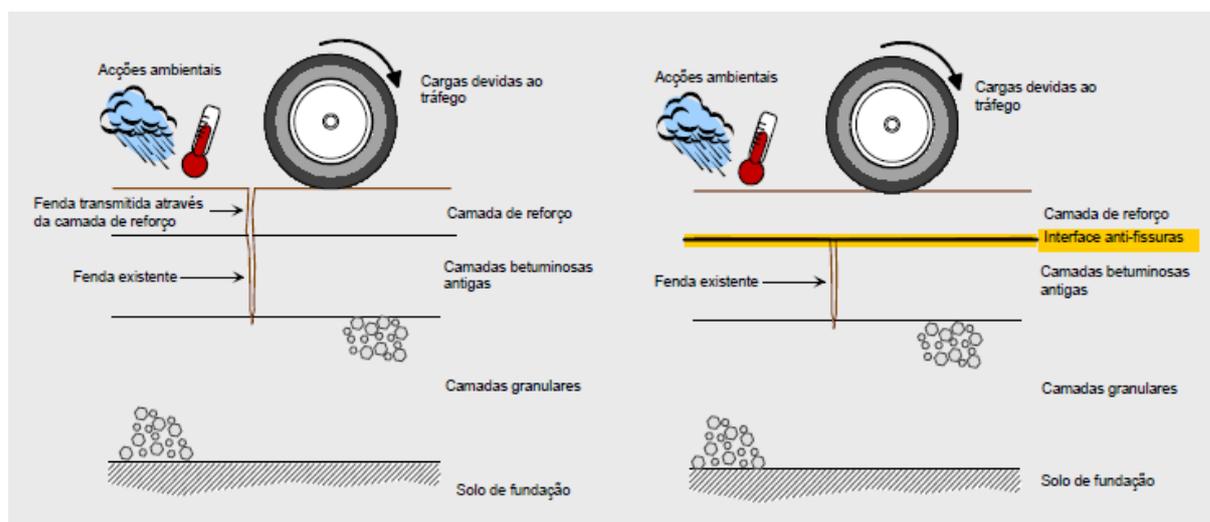


Figura 39: Mecanismo de propagação de fendas e respetivo sistema anti-reflexão de fendas (Batista, 2005)

As SAMI's consistem na aplicação de camadas de betume de pequenas espessuras, localizadas entre a camada antiga e a camada nova, com o objetivo de evitar a propagação de fendas entre as camadas. Esta camada normalmente tem espessuras na ordem dos 2 cm e é constituída por uma elevada quantidade de betume modificado e agregados de pequenas dimensões.

Um método pouco económico compreende a aplicação de camadas de reforços com espessuras elevadas, como medida para retardar o aparecimento de fendas. A aplicação de camadas com espessuras consideráveis e o uso de misturas mais resistentes à propagação de fendas dificulta a formação e propagação das fendas.

Uma solução pouco viável é a aplicação da camada de reforço a trabalhar em separado (como se esta não estivesse ligada à camada existente), ou seja, a camada de reforço resiste a todos os esforços de tração, sendo por isso necessário a camada de reforço possuir uma boa resistência e elevada espessura (Batista, 2004; Branco *et al.*, 2006).

As grelhas (Figura 40) e as armaduras (Figura 41) são colocadas na interface da camada existente e da camada de reforço, absorvendo os esforços que se geram nos bordos das fendas, de modo a evitar que esses esforços se transmitam diretamente para a camada de reforço.

As grelhas são um material sintético com elevada resistência à tração, que para além de minimizarem o aparecimento de fendas aumentam ligeiramente a capacidade de carga do pavimento.

O conjunto grelha/pavimento tem uma boa interação, devido à grelha ser de malha quadrada ou retangular, possibilitando maior aderência da mistura betuminosa a esta. A grelha é constituída normalmente por polipropileno, polietileno, poliéster ou fibra de vidro.

As armaduras são idênticas às grelhas, sendo que estas são utilizadas para resolver casos mais severos de fendilhamento. São compostas por malhas de aço e ferro galvanizado.

A vantagem de se adotar armaduras em vez das grelhas é a redução da espessura do reforço, devido ao conjunto armadura/pavimento ser mais resistente que o conjunto grelha/pavimento. Os esforços transmitidos ao pavimento são melhores distribuídos se este possuir armadura, contribuindo desta forma para a capacidade estrutural do pavimento (Batista, 2004; Benta, 2012; Branco *et al.*, 2006).



Figura 40: Aspeto de uma grelha (Retirado de Huenker, 2009)



Figura 41: Exemplo de colocação da malha de aço (Retirado de Geofoco, 2013)

Os geotêxteis são mais uma solução de limitação ou eliminação da propagação de fendas, que consiste na aplicação de uma rega betuminosa (geralmente um betume modificado com polímeros) sobre a camada antiga, para posteriormente ser colocado o geotêxtil. O reforço é aplicado sobre o geotêxtil.

Esta técnica anti-fendas é uma espécie de manta de espessura reduzida, que absorve as tensões de tração concentradas na extremidade da fenda, reduzindo a propagação desta para camadas superiores (Francisco, 2012; Branco *et al.*, 2006).



Figura 42: Aplicação do geotêxtil sobre a rega betuminosa (Batista, 2005)

As técnicas de anti-reflexão de fendas contribuem para aumentar a durabilidade do pavimento, contudo estas técnicas não têm capacidade de reabilitar estruturalmente um pavimento. Estas técnicas complementam os reforços aplicados em pavimentos bastantes fendilhados.

5.7. Materiais Tratados com Ligantes Hidráulicos

Os materiais granulares são empregues na construção de camadas de base e de sub-base dos pavimentos. Quando se pretende uma maior rigidez destas camadas, criando condições mais resistentes e menos deformáveis, recorre-se a materiais tratados com ligante hidráulico.

A estabilização dos materiais confere a capacidade de resistir e suportar as cargas e os esforços às ações erosivas de agentes naturais.

Os materiais tratados com ligantes hidráulicos aplicados em camadas de sub-base e de base de pavimentos são essencialmente o solo-cimento, o agregado de granulometria extensa tratado com cimento (AGEC) e o betão pobre.

O solo-cimento é uma mistura homogénea de solos, cimento e água, normalmente fabricado em central. O processo realizado *in situ* é normalmente aplicado em camada de leito de pavimento.

O AGEC e o betão pobre são basicamente materiais semelhantes ao solo-cimento, fabricados geralmente com agregados britados. A diferença destes para o solo-cimento são as maiores exigências de qualidade aplicadas, relativamente aos agregados e às características de resistência da mistura.

Durante a construção, o controlo da execução das camadas de materiais tratados com ligantes hidráulicos incide sobre a resistência mecânica da mistura, a compactação relativa das camadas e as suas características geométricas (espessura das camadas e regularidades) (Estradas de Portugal, 2012; CEPSA, 2006).

5.8. Controlo de Qualidade

O controlo de qualidade consiste na análise de todos os processos desde a receção dos materiais à execução em obra, assegurando assim que são conduzidos dentro das recomendações impostas.

Os produtos aplicados numa empreitada devem estar em conformidade com a legislação atual. A marcação CE é obrigatória para todos os produtos de construção. Aqueles em que não é obrigatória a marcação CE devem apresentar certificado da sua conformidade com as especificações técnicas em vigor em Portugal.

O controlo de qualidade dos materiais, do produto executado e do processo de execução dos trabalhos é da responsabilidade da fiscalização. A fiscalização deve elaborar certificados de conformidade ou documentos de inspeção e análise, devendo estes possuir a identificação clara dos produtos aos quais se referem e as normas e/ou especificações segundo os quais foram ensaiados (Estradas de Portugal, 2012).

5.9. Condicionantes na Reabilitação de Pavimentos Rodoviários em Ambiente Urbano

Na reabilitação de pavimentos rodoviários existem fatores que condicionam os tempos de execução e as espessuras de reforço a aplicar, normalmente este tipo de condicionalismos surgem na reabilitação de pavimentos em ambiente urbano.

Os condicionalismos presentes na reabilitação de pavimentos rodoviários em ambiente urbano são os seguintes:

- Presença de serviços (passeios, caixas de visita, sarjetas) que limitam as espessuras de reforço a aplicar ou impossibilitam a aplicação de reforço sem prévia fresagem;
- Tempos de execução, visto que as estradas urbanas com carácter mais relevante são muito movimentadas. O desvio do tráfego para possibilitar a intervenção, por vezes é complicado, sendo necessário reduzir os tempos de execução, para minimizar a intromissão com o tráfego corrente.

Os serviços existentes definem as cotas máximas que o pavimento pode ter, não sendo aconselhável que a cota do pavimento seja próxima da cota do passeio, para proporcionar o correto funcionamento de ambas as estruturas.

As sarjetas e as caixas de visitas são outro obstáculo que limitam as cotas, a solução aplicada tem de ser planeada em função destas limitações.

Quando não existe a possibilidade de desviar o tráfego para se proceder à reabilitação, é necessário arranjar soluções que reduzem o tempo de constrangimento. As soluções passam pela utilização de técnicas de reabilitação com menores tempos de execução.

O dimensionamento da solução a aplicar será sempre em função destas condicionantes.

6. CASO DE ESTUDO

6.1. Enquadramento

A reabilitação de pavimentos rodoviários em ambiente urbano apresenta características particulares que devem ser estudadas de forma a otimizar as intervenções de manutenção e de reabilitação, permitindo avultadas poupanças de recursos. Desta forma, pretende-se estudar as metodologias de reabilitação de pavimentos rodoviários em meio urbano.

O caso de estudo é a beneficiação/reabilitação de um troço do pavimento da Avenida da Universidade, arruamento situado na cidade de Aveiro. O troço em causa está representado na Figura 43 e foi selecionado por se encontrar em mau estado de conservação em relação ao resto da Avenida da Universidade, com necessidade de intervenção mais profunda.



Figura 43: Localização e visualização do troço de estudo da Avenida da Universidade (Retirado de Google Earth, 2013)

A Avenida da Universidade insere-se na EN 235 e situa-se no interior da cidade de Aveiro. O troço em estudo tem aproximadamente 220 m e é delimitado pela rotunda do Hospital Infante D. Pedro e pelo cruzamento da Avenida Artur Favara e da Rua S. Clube Beira-Mar com a Avenida da Universidade.

De referir que a Avenida da Universidade foi dividida em dois casos de estudo, cada caso de estudo corresponde a um trabalho prático, em que um caso de estudo retrata um troço em que

o pavimento está visivelmente mais degradado (Figura 44 – troço destacado à amarelo) e no outro caso de estudo o pavimento apresenta melhor aspeto (Figura 44 – troço destacado a verde). Esta divisão facilitou a execução dos trabalhos mais práticos (ensaios laboratoriais). Assim, o presente trabalho foi dirigido à reabilitação do troço destacado a amarelo e o outro trabalho, a cargo do colega Paulo Ferreira, ficou o troço destacado a verde. Contudo houve dados conjuntos que serviram para os dois casos de estudo, como veremos mais à frente. Na Figura 44 ainda se verifica a designação atribuída a todos os locais onde foram realizadas sondagens de prospeção.

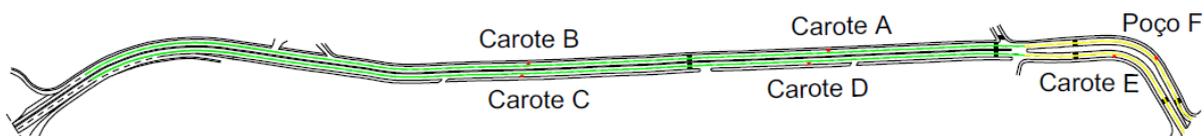


Figura 44: Divisão da Avenida da Universidade em troços de estudo e localização e designação das prospeções realizadas



Figura 45: Conjunto de fotografias que ilustram o panorama geral do troço em estudo da Avenida da Universidade (fotografias de autor)

Na Figura 45 verifica-se que a Avenida da Universidade, em particular o troço em estudo, se encontra num estado de degradação avançado, apresentando todo o tipo de degradação

(fendilhamento, pele de crocodilo, rodeiras, reparações, covas). O volume de tráfego é elevado e durante a inspeção local foi visível a circulação de alguns veículos pesados, nomeadamente pesados de transporte de passageiros.

A drenagem das águas superficiais é efetuada através de sumidouros situados junto do passeio, sendo que durante a inspeção a primeira impressão foi que existiria um número insuficiente de sumidouros.

A diferença de cotas entre o pavimento e o passeio é reduzida, sendo que nalguns sítios tem no máximo 7 cm. Esta reduzida diferença de cotas poderá dificultar ou impedir a colocação do reforço sobre o pavimento existente, pois não é aconselhável que a cota do pavimento seja próxima da cota do passeio e, muito menos, igual ou superior.

O troço em estudo é constituído por duas faixas de rodagem, cada uma com duas vias de tráfego em cada sentido. Existem passeios em ambos os lados exteriores da faixa de rodagem, existindo um separador central com cerca de 6 m conforme a Figura 46 e o Anexo III.

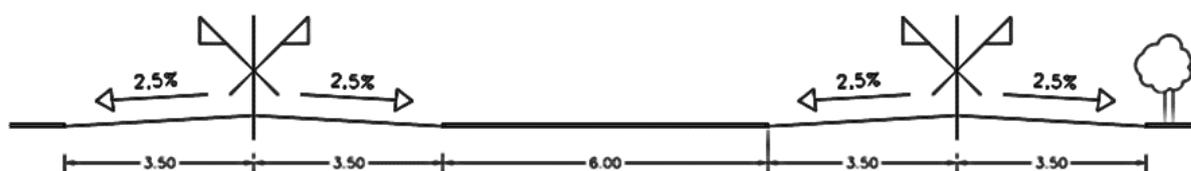


Figura 46: Perfil transversal simplificado da Avenida da Universidade

O aspeto do troço em estudo ao longo dos últimos meses sofreu diversas alterações, estando sistematicamente a ser remodelado devido aos ciclos de degradações e reparações num espaço de tempo muito curto.

A Figura 47 ilustra o estado lastimável que o pavimento da Avenida da Universidade de Aveiro atingiu durante o Inverno. As camadas do pavimento completamente destruídas, nomeadamente com as camadas granulares à vista, o pavimento apresentava um estado de ruína total. As entidades responsáveis pela manutenção e conservação optavam por reparações de fraca qualidade e desenquadradas. Nesta situação (Figura 47 c)) aplicaram material granular para preencher os enormes buracos, porém mais tarde foi necessária a execução de um remendo em material betuminoso.



Figura 47: Fotografias do troço em estudo da Universidade de Aveiro captadas durante o Inverno (fotografias de autor)

6.2. Avaliação do Estado Superficial do Pavimento

O pavimento do troço em estudo foi submetido a uma inspeção visual à superfície do pavimento, onde se verificou que este possuía todo o tipo de degradações (fendilhamento, pele de crocodilo, peladas, covas, rodeiras). A caracterização da situação existente está explícita no Anexo IV, onde estão esquematizadas as áreas mais afetadas e quais os tipos de patologia mais frequentes. Para auxiliar e perceber a situação existente, existem diversas fotografias que ilustram o aspeto do troço em pontos específicos.

Como a estrada possui duas faixas de rodagem, separadas por um separador central, a avaliação do estado superficial do pavimento foi realizada separadamente para cada uma delas. As faixas foram denominadas como a faixa sentido Norte-Sul (faixa em que os veículos circulam no sentido Hospital Infante D. Pedro-Aradas) e faixa sentido Sul-Norte (faixa em que os veículos circulam no sentido Aradas-Hospital Infante D. Pedro).

Com base na metodologia descrita no subcapítulo 3.1.1., obtiveram-se os seguintes índices de qualidade global:

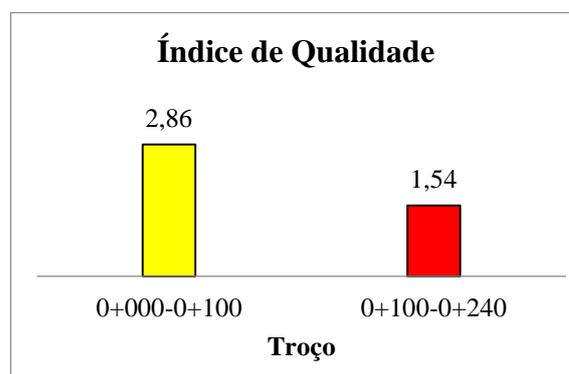
- Sentido Norte-Sul

O Índice de Qualidade global obtido no troço (IQ=2,40) deu indicação de um pavimento em estado razoável, contudo verifica-se que nos últimos metros o estado do pavimento se encontra em piores condições comparando com o início do troço (Tabela 15).

Tabela 15: Índice de qualidade no Sentido Norte-Sul

IQ de 100 em 100 metros	
Troço (m)	Índice de Qualidade
0+000-0+100	2,86
0+100-0+240	1,54
IQ do troço completo	
Troço (m)	Índice de Qualidade
0+000-0+240	2,40

a) Valores do IQ



b) Ilustração gráfica do IQ de 100 em 100 m

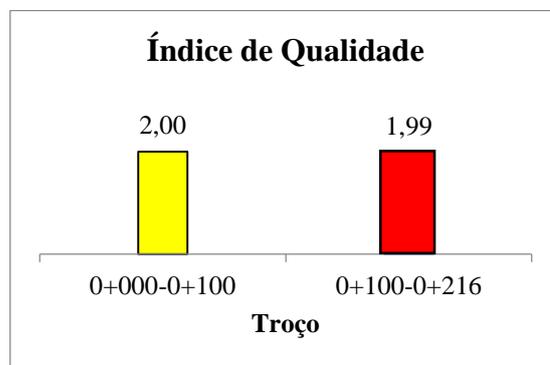
- Sentido Sul-Norte

O Índice de Qualidade global obtido no troço (IQ=2,00) deu indicação de um pavimento a necessitar de intervenção, verifica-se que o estado do pavimento ao longo do troço é uniforme (Tabela 16).

Tabela 16: Índice de qualidade no Sentido Sul-Norte

IQ de 100 em 100 metros	
Troço (m)	Índice de Qualidade
0+000-0+100	2,00
0+100-0+216	1,99
IQ do troço completo	
Troço (m)	Índice de Qualidade
0+000-0+216	2,00

a) Valores do IQ



b) Ilustração gráfica do IQ de 100 em 100 m

No Anexo V encontram-se todos os cálculos para a obtenção do IQ. É possível constatar as patologias mais frequentes e os seus níveis de gravidade.

Através desta avaliação de qualidade global verifica-se que o troço necessita de intervenção imediata.

6.3. Avaliação da Constituição do Pavimento

A avaliação da constituição do pavimento foi realizada em função de uma campanha de prospeção mecânica planeada atendendo aos resultados do levantamento visual das degradações. A campanha consistiu na abertura de um poço de prospeção e da realização de um carote no pavimento, com o objetivo de quantificar as espessuras das diferentes camadas e obter amostras para a caracterização dos materiais (betuminosos e granulares) e da fundação.

O poço foi realizado no sentido Norte-Sul (Figura 48), visto ser este sentido que apresentava pior cenário, com o objetivo de se atingir o solo de fundação. Através do poço foi possível determinar a estrutura de pavimento existente e, por outro lado, foi possível recolher amostras com vista a realização de ensaios laboratoriais para a caracterização dos materiais (das misturas betuminosas, das camadas granulares e do solo de fundação).

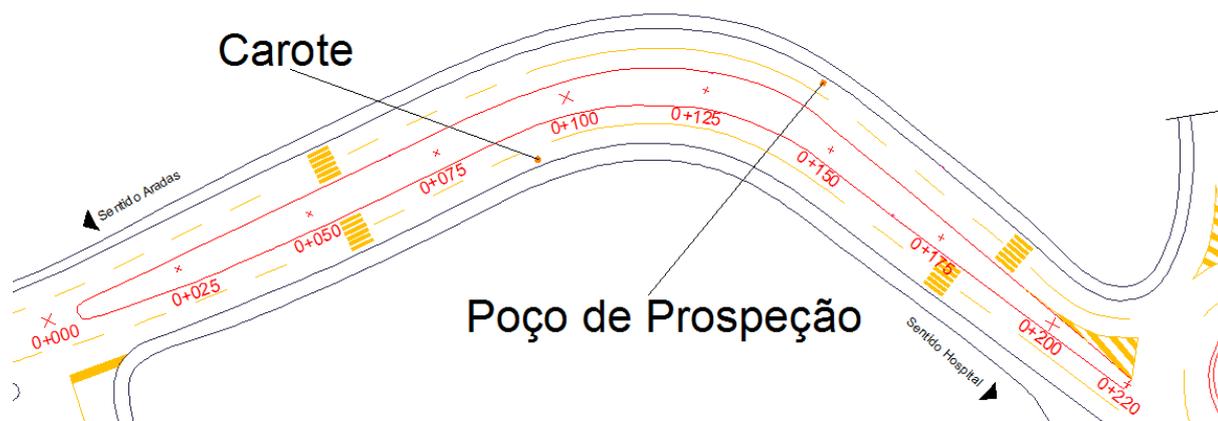


Figura 48: Localização do Poço de Prospeção e do Carote

A realização do poço de prospeção foi efetuada conforme a Figura 49. Como o laboratório do departamento de Engenharia Civil de Aveiro não possui nenhum equipamento destinado à realização de poços procedeu-se à abertura do poço através de várias carotagens, neste caso realizou-se 4 furos de maneira a obter-se uma área suficiente para o acesso às camadas subjacentes (as camadas granulares e o solo de fundação).

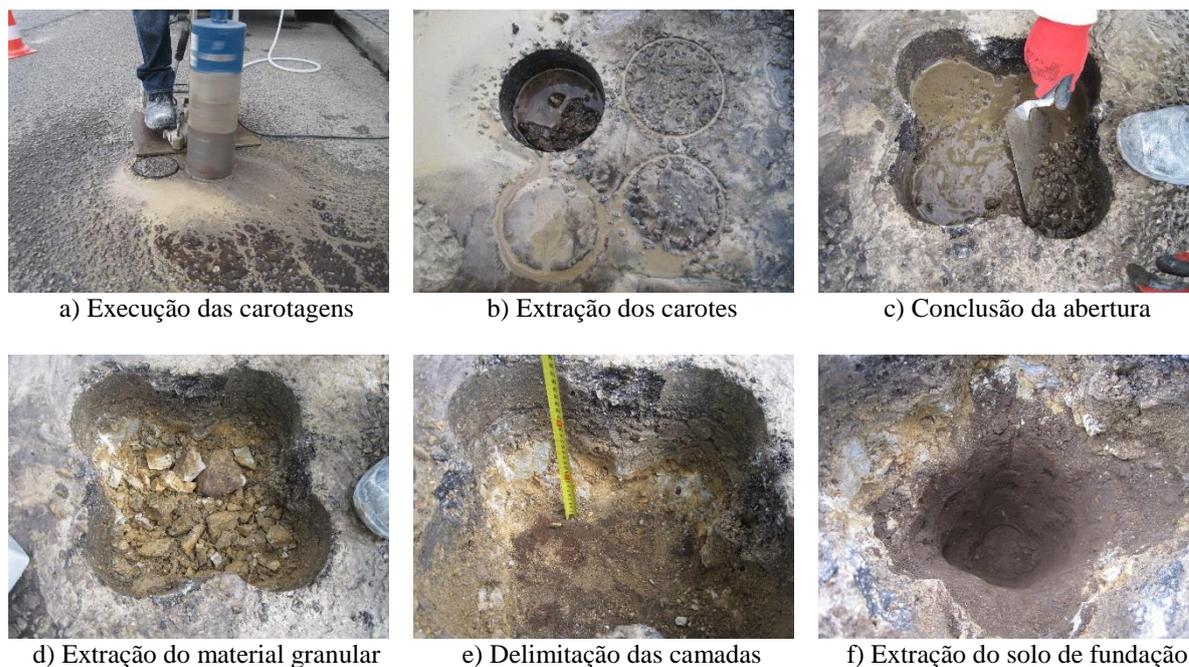


Figura 49: Sequência da realização do poço de prospecção (fotografias de autor)

Dos 4 carotes realizados no poço de prospecção, foi selecionado um para se proceder mais tarde aos ensaios laboratoriais, tendo sido designado por carote F, enquanto o carote realizado na outra faixa foi denominado por carote E. O carote E (Figura 50) foi extraído do pavimento no sentido Sul-Norte, ao quilómetro 0+090 na rodeira externa.



Figura 50: Carote extraído no sentido Sul-Norte da Avenida da Universidade (fotografias de autor)

Segundo a estrutura do pavimento verificada no sentido Norte-Sul, tendo em conta a informação recolhida no poço, as camadas betuminosas apresentavam uma espessura de 9 cm. Já a observação do pavimento, onde foi realizado o carote E, no sentido inverso, as camadas betuminosas apresentam uma espessura na ordem 14 cm. Distinguiram-se duas camadas betuminosas diferentes através dos dois pontos de inspeção, sendo que a camada superior corresponde a um betão betuminoso com agregado de granítico e a camada inferior a uma

mistura betuminosa densa, também com agregado granítico. As misturas betuminosas estavam assentes numa camada de agregado grosseiro envolvido com betume.

Tabela 17: Características geométricas das camadas betuminosas de desgaste (betão betuminoso) e da camada de regularização (mistura betuminosa densa)

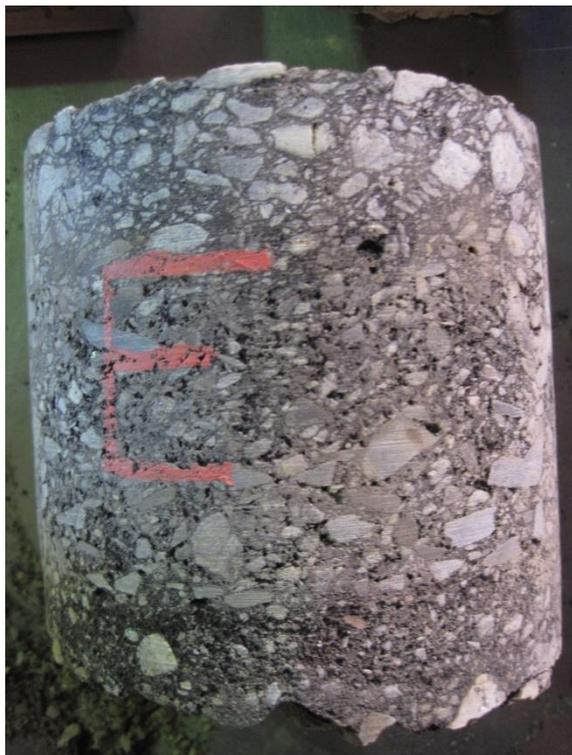
Carote E			
Camada de Desgaste (mm)		Camada de Regularização (mm)	
E ₁	108,0	E ₁	34,5
E ₂	103,0	E ₂	34,4
E ₃	107,0	E ₃	34,5
E ₄	103,0	E ₄	34,6
E _{média}	105,3	E _{média}	34,5
Carote F			
Camada de Desgaste (mm)		Camada de Regularização (mm)	
E ₁	61,5	E ₁	23,0
E ₂	63,5	E ₂	23,2
E ₃	65,5	E ₃	22,8
E ₄	65,5	E ₄	23,0
E _{média}	64,0	E _{média}	23,0

Na Tabela 17 estão representadas as características geométricas das camadas betuminosas, em que se realizou 4 medições e a espessura de cada camada resultou da média desses 4 valores.

Na Figura 51 a) e b) é possível verificar a delimitação das duas camadas (camada de desgaste e de regularização) antes de se proceder à sua separação. Na Figura 51 c) e d) está ilustrado a execução da medição da espessura da camada de desgaste dos carotes.

A realização do poço de prospeção foi fundamental para a observação das camadas subjacentes às camadas betuminosas. Verificou-se a presença de uma camada de agregado grosseiro envolvida em betume, será designada por semipenetração, com aproximadamente 5 cm de espessura, conforme a Figura 52.

A Figura 53 apresenta a estrutura observada através da extração do carote E, foi possível retirar algum material subjacente às camadas betuminosas, em que se verificou que era semelhante ao material da camada de semipenetração observada no poço de prospeção.



a) Carote E



b) Carote F



c) Camada de desgaste do carote E



d) Camada de desgaste do carote F

Figura 51: Fotografias dos carotes extraídos (fotografias de autor)

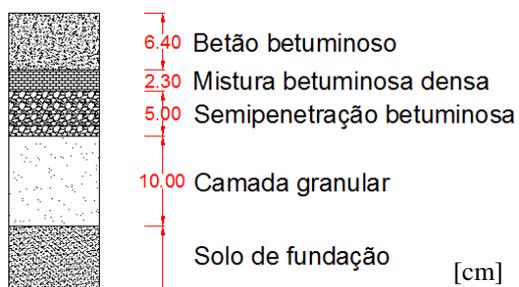


Figura 52: Estrutura observada através da realização do poço de prospeção

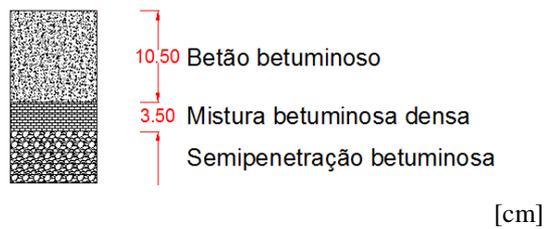


Figura 53: Estrutura observada através da realização do carote E

A camada granular existente era de fraca qualidade, como se pode observar na Figura 54, era constituída por agregado de grandes dimensões, sendo mesmo necessário partir o agregado de maiores dimensões para possibilitar a sua extração. A espessura desta camada era de aproximadamente 10 cm e era notório a existência de finos provenientes do solo de fundação.

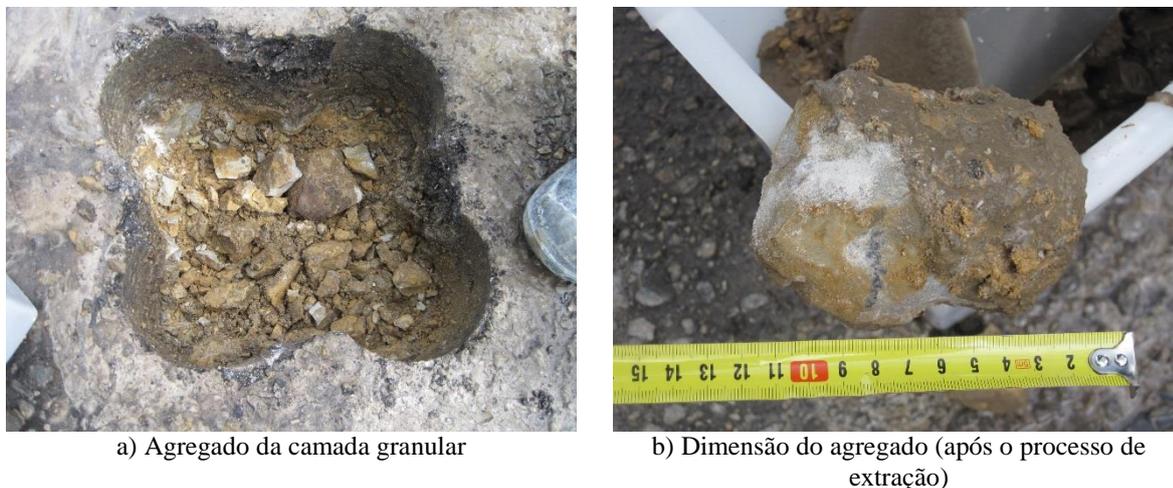


Figura 54: Fotografias do aspeto da camada granular (fotografias de autor)

O solo de fundação (Figura 55) estava a uma profundidade de aproximadamente 24 cm, era semelhante a terra vegetal e apresentava alguma contaminação (bocados de tijolo). Acondicionou-se uma amostra do solo de fundação para manter o teor em água para mais tarde, em laboratório, se determinar o teor em água.



Figura 55: Fotografias alusivas ao solo de fundação (fotografias de autor)

6.4. ENSAIOS LABORATORIAIS

A determinação das características dos materiais foi realizada em laboratório com objetivo de determinar parâmetros importantes para a caracterização do pavimento existente. Foram realizados ensaios ao solo de fundação, ao material granular, e também às misturas betuminosas. Em seguida apresentam-se os resultados da caracterização geotécnica.

6.4.1. Solo de Fundação

Para o solo de fundação foi determinado o teor de humidade do solo *in situ*, CBR, limites de consistência e a granulometria do solo.

Nos pontos seguintes são apresentados os resultados dos ensaios realizados com vista à caracterização geotécnica do solo de fundação.

6.4.1.1. Teor de Humidade *in situ*

O cálculo do teor de humidade foi realizado aquando da chegada ao laboratório, de maneira a que o material não perdesse qualquer teor de água. Na Tabela 18 apresenta-se o teor de humidade, determinado através da pesagem da amostra de solo húmido e pesagem do solo seco, após este ir à estufa a uma temperatura de 100°C.

Tabela 18: Teor de Humidade do solo de fundação *in situ*

Massa do solo húmido (g)	Massa do solo seco (g)	Massa de água (g)	Teor de humidade (%)
200	180,02	19,98	11,1%

O teor de humidade determinado foi de 11,1%.

6.4.1.2. Análise Granulométrica

A análise granulométrica do solo de fundação foi realizada segundo a especificação E 196 (LNEC, 1966), utilizaram-se peneiros ASTM. Obtiveram-se os resultados apresentados na Tabela 19, dos quais resulta a curva granulométrica apresentada na Figura 56.

Tabela 19: Resultados da análise granulométrica do solo de fundação

Peneiros ASTM	Abertura da malha (mm)	Percentagem acumulada de material passado (%)
1"	25,0	100,00
3/4"	19,0	100,00
3/8"	9,5	97,37
nº 4	4,75	94,08
nº 10	2,0	87,81
nº 20	0,85	67,14
nº 40	0,425	41,92
nº 60	0,250	28,96
nº 140	0,106	19,69
nº 200	0,075	16,25

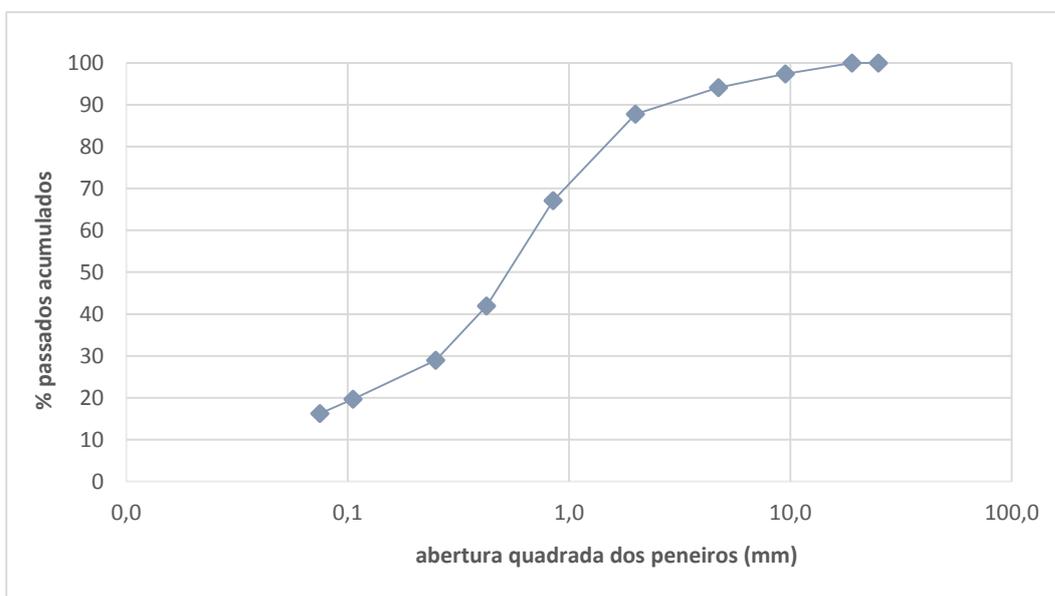


Figura 56: Curva granulométrica do solo de fundação



b) Peneiros ASTM



a) Aspetto do solo de fundação após peneiração

Figura 57: Série de peneiros ASTM e aspeto do solo após a peneiração (fotografias de autor)

6.4.1.3. Limites de Consistência

Os limites de consistência destinam-se a avaliar as características de plasticidade de um solo fino. Estes limites compreendem o limite de liquidez (LL) e o limite de plasticidade (LP). A partir da diferença numérica entre o limite de liquidez e o limite de plasticidade (LL-LP) obtém-se o índice de plasticidade (IP).

Limite de Liquidez

Para a obtenção do limite de liquidez seguiu-se o procedimento indicado na ISO/TS 17892-6:2004.

Com os valores de teor de humidade e de penetração da Tabela 20, construiu-se o gráfico da Figura 58, onde se obteve a reta através da interpolação dos vários pontos. O LL é expresso pelo teor de humidade correspondente à penetração de 20 mm. Através do gráfico obteve-se um valor para o limite de liquidez de 21,6 %.

Tabela 20: Valores do teor de humidade e de penetração de 4 amostras de solo da fundação

Cápsula nº	1	2	3	4
M amostra húmida (g)	25,2	19,7	25,0	20,8
M amostra seca (g)	20,1	15,6	19,4	16,0
Penetração (mm)	12,2	16,3	21,3	30,7
Teor de água (%)	20,2	20,8	22,4	23,1

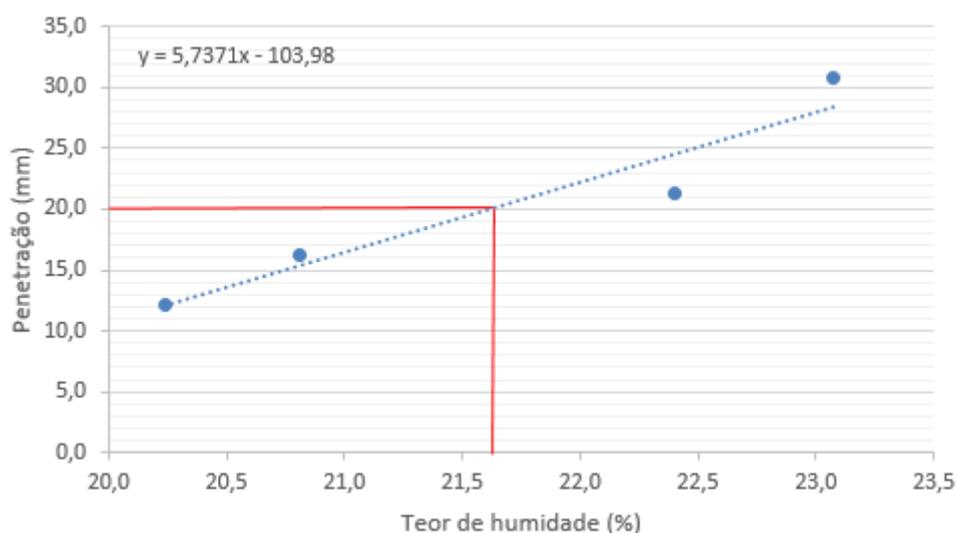


Figura 58: Gráfico para a obtenção do LL

Limite de Plasticidade

Para a obtenção do limite de Plasticidade seguiu-se o procedimento indicado na NP-143 (IPQ, 1969) e obteve-se o LP indicado na Tabela 21.

Tabela 21: Determinação do Limite de Plasticidade

Cápsula nº	1	2	3	4
M amostra húmida (g)	15,9	25,5	26,1	15,2
M amostra seca (g)	13,3	21,2	21,7	12,8
Teor de água (%)	16,4	16,9	16,9	15,8

Limite de Plasticidade (LP)

16,5 %

O índice de plasticidade, como anteriormente referido, obtém-se através da diferença do valor do LL e do LP, portanto o IP do solo de fundação é de 5 %.

Com base nos resultados dos ensaios análise granulométrica e dos limites de consistência, procedeu-se à classificação do solo de fundação para fins rodoviários, segundo a especificação E 240 (LNEC, 1970).

A classificação para fins rodoviários destina-se a classificar os solos em grupos, tendo em conta o seu comportamento em estradas. De acordo com a especificação E 240, o solo da fundação é classificado como sendo um A-1-b (0), possuindo um comportamento de excelente a bom.

6.4.1.4. Proctor Modificado

O ensaio Proctor foi realizado segundo a especificação E 197 (LNEC, 1967b), unicamente para se obter 3 provetes compactados por apiloamento, para se utilizarem no ensaio de CBR. Os provetes foram realizados com teor em água de 10,9%, teor em água que não corresponde ao valor ótimo, e com compactações diferentes entre cada provete, variando entre 12, 25 e 55 pancadas. A compactação utilizada foi a pesada em molde grande, conforme a Figura 59.



Figura 59: Procedimento do ensaio Proctor (fotografias de autor)

6.4.1.5. Ensaio de CBR (*California Bearing Ratio*)

O ensaio de CBR foi realizado segundo a especificação E 198 (LNEC, 1967a) e consiste em medir a força necessária para que um pistão normalizado penetre no solo (solo de fundação) até uma certa profundidade (2,5 mm e 5 mm) com uma velocidade constante.

Os provetes realizados através da compactação foram imersos durante 96 horas, onde a expansão do material foi controlada através de um defletómetro. Nenhum dos provetes apresentou alterações significativas relativamente à expansão do material.

Os valores utilizados para o cálculo do valor de CBR são as leituras obtidas da penetração aos 2,5 mm e 5 mm, obtendo um gráfico que relaciona estes valores com a compactação relativa obtida para cada provete. Do gráfico retira-se o valor de CBR para 95% de compactação relativa.

Na Figura 60 está ilustrado o procedimento do ensaio de CBR, desde a imersão em água do provete durante 96h, à realização do ensaio de penetração até ao aspeto final do provete após o ensaio de penetração.



Figura 60: Procedimento do ensaio de CBR (fotografias de autor)

Para uma compactação relativa de 95% obteve-se um valor de CBR de 7% para o solo de fundação, valor aceitável para o material em causa.

6.4.2. Camadas Granulares

Para a camada granular foi determinado o equivalente de areia. A análise granulométrica não foi possível, pois a camada granular apresentava agregado muito grosseiro e durante a extração da amostra foi necessário partir alguns desses agregados, adulterando a amostra.

6.4.2.1. Equivalente de Areia

O ensaio de equivalente de areia (EA) foi realizado segundo a especificação NP EN 933-8 (IPQ, 2002) e permite avaliar a quantidade de finos associados a um agregado, isto é, avaliar o seu estado de limpeza.

Na Figura 61 está ilustrado a fase final deste ensaio, etapa em que se registou o valor de equivalente de areia de 37%.

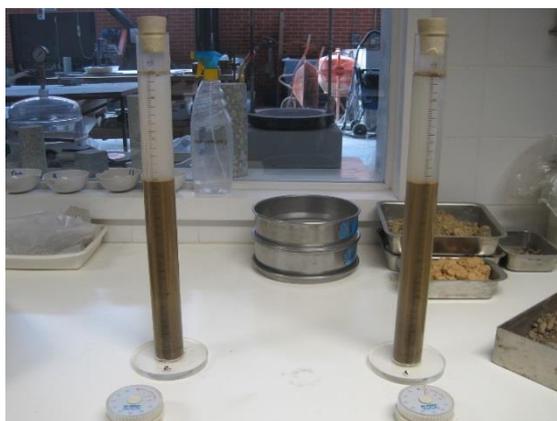


Figura 61: Ensaio de equivalente de areia (fotografia de autor)

Segundo o caderno de encargos os valores mínimos para agregados britados de granulometria extensão são (Estradas de Portugal, 2012):

- EA = 40% para aplicação em camada de sub-base, se o teor total de finos for superior a 3%;
- EA = 50% para aplicação em camada de base, se o teor total de finos for superior a 3%.

Como não se realizou a análise granulométrica do material constituinte da camada granular não se sabe o valor da percentagem de finos, mas é perceptível que o material granular possui mais de 3% de finos, o que nos indica que este material não é adequado nem para aplicação em camada de sub-base, nem em camada de base.

6.4.3. Misturas Betuminosas

Para as misturas betuminosas foi determinado os parâmetros baridade aparente, baridade máxima teórica, teor em betume e a análise granulométrica dos agregados que constituem a mistura betuminosa.

Os carotes betuminosos (E e F), constituídos por uma camada de desgaste e outra de regularização, foram sujeitos à separação destas duas camadas, para se proceder à sua análise em separado.

6.4.3.1. Baridade Aparente

A baridade de cada provete foi determinada de acordo com a norma NP EN 12697-6 (IPQ, 2010).

Na Tabela 22 apresentam-se os resultados experimentais obtidos da baridade dos provetes.

Tabela 22: Resultados experimentais da baridade dos provetes

Amostra	Camada	Baridade (g/cm ³)
E	Desgaste	2,27
	Regularização	2,08
F	Desgaste	2,28
	Regularização	2,26

6.4.3.2. Baridade Máxima Teórica

A baridade máxima teórica foi determinada de acordo com a norma EN 12697-5 (CEN, 2002). O procedimento utilizado consiste na extração de ar residual presente nas partículas através de um picnómetro de vácuo (Figura 62).



Figura 62: Procedimento do ensaio de baridade máxima teórica (fotografias de autor)

Na Tabela 23 apresentam-se os resultados experimentais obtidos da baridade máxima teórica.

Tabela 23: Resultados experimentais da baridade máxima teórica

Amostra	Camada	Baridade (g/cm ³)
E	Desgaste	2,47
	Regularização	2,51
F	Desgaste	2,53
	Regularização	2,39

6.4.3.3. Teor em Betume

O teor de betume foi obtido através de um processo de extração, segundo a norma ASTM D 2172 (ASTM, 1995). A extração do betume foi realizada segundo o método B (Figura 63), presente na norma, e consiste na dissolução do betume com recurso a um solvente, o tricloroetileno. O processo consiste num ciclo, onde o tricloroetileno quando aquecido tende a subir e ao atinge a superfície superior (esta possui um sistema de circulação de água para a manter fria) condensa e escorre envolvendo toda a amostra, este ciclo repete-se até a amostra não possuir betume.



Figura 63: Procedimento da extração do betume (fotografias de autor)

Realizou-se a extração de betume da cada uma das camadas, sendo que para a camada de desgaste se obteve uma percentagem de betume de 5,6% (valor que resultou da média dos teores

de betume verificados nas duas amostras de desgaste, Tabela 24), enquanto para a camada de regularização se obteve uma percentagem de betume de 6,6% (valor que resultou da média dos teores de betume verificados nas duas amostras de regularização, Tabela 24).

Tabela 24: Teor de betume por localização e camada

Amostra	Camada	Teor betume (%)
E	Desgaste	5,5
	Regularização	6,0
F	Desgaste	5,7
	Regularização	7,3

6.4.3.4. Análise Granulométrica

Após a separação do betume dos agregados realizou-se a análise granulométrica da mistura de desgaste (BB) da zona E e F segundo a norma NP EN 933-1 (IPQ, 2000).

Através da Tabela 25 e da Figura 64 verifica-se que as misturas E e F são idênticas, podendo-se afirmar que a mistura betuminosa aplicada foi a mesma para as duas zonas. Outro facto que reforça esta suposição é o teor em betume ser idêntico nas duas zonas.

Tabela 25: Análise granulométrica da mistura de desgaste da zona E e F

Abertura da malha dos peneiros (mm)	Zona E	Zona F
	Percentagem acumulada de Material Passado (%)	Percentagem acumulada de Material Passado (%)
16,0	100,00	100,00
8,0	87,97	84,29
4,0	67,43	66,16
2,0	47,13	47,48
1,0	32,63	34,18
0,500	23,57	26,02
0,250	14,15	16,03
0,125	8,84	10,80
0,063	5,83	7,65

Na Figura 64 verifica-se que as curvas granulométricas das duas misturas não estão dentro do fuso granulométrico das camadas de misturas betuminosas a quente com características de desgaste, recomendado pelo Caderno de Encargos (Estradas de Portugal, 2012).

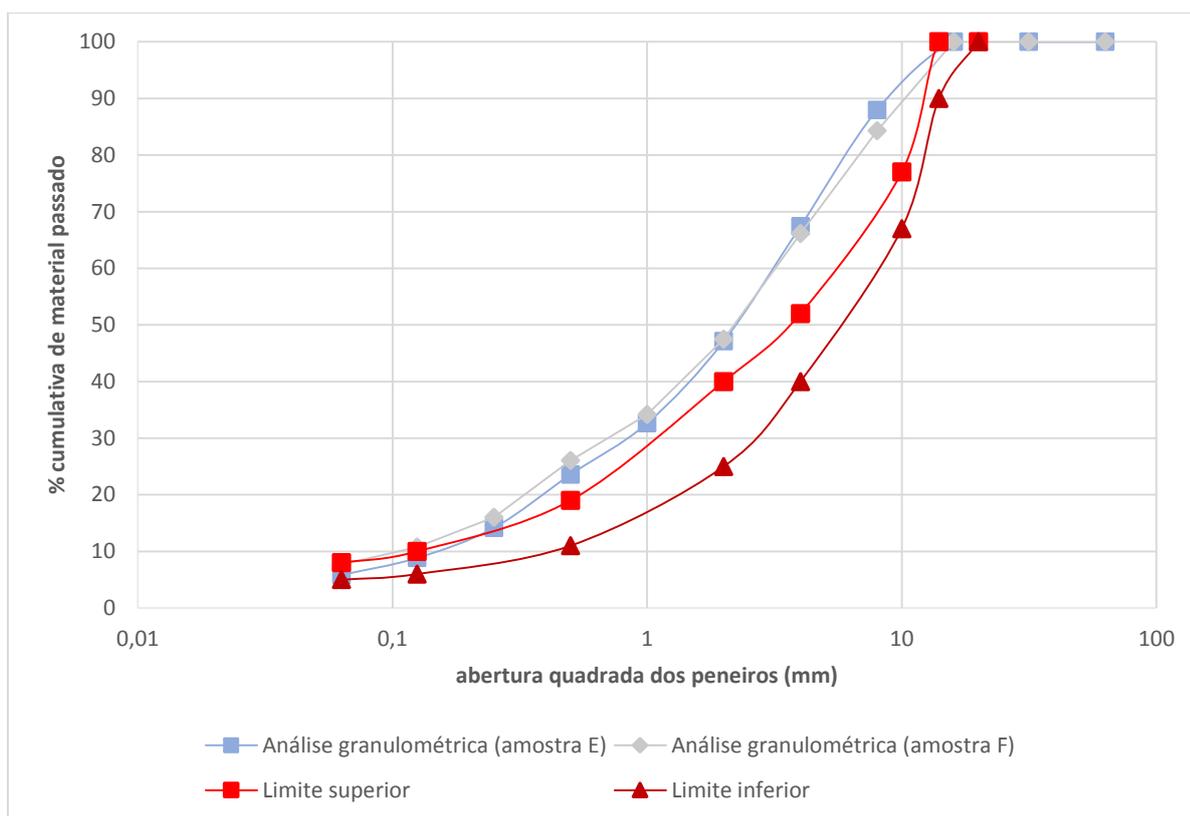


Figura 64: Enquadramento da curva granulométrica da mistura E e F no fuso granulométrico do Caderno de Encargos (Estradas de Portugal, 2012)

Conclui-se que a mistura betuminosa de camada de desgaste não verifica os requisitos do Caderno de Encargos (Estradas de Portugal, 2012).

6.5. Caracterização das Ações

6.5.1. Tráfego

O volume de tráfego adotado foi baseado num relatório de tráfego cedido pela CMA, realizado em 2008, segundo o qual se assumiu que o tráfego médio diário anual é de 9427 veículos, sendo a percentagem de pesados adotada de 7% em ambos os sentidos, conforme a Figura 65.

Este valor relativo à percentagem de pesados é descrito no relatório como sendo a percentagem apenas no sentido Aradas-Hospital, pois no sentido contrário o valor descrito é cerca de 40% de pesados, o que atualmente se constatou ser bastante exagerado. De forma a viabilizar os dados do relatório foi-se ao terreno e fez-se a contagem de veículos em ambos os sentidos, concluindo-se que o tráfego de pesados é cerca de 7% no sentido Aradas-Hospital e aproximadamente 4% no sentido inverso, contudo considerou-se 7% em ambos os sentidos.

Posto isto, o tráfego médio diário anual de pesados é 660, com uma taxa de crescimento correspondente a 4%. O projeto de reforço é dimensionado para um período de 10 anos.

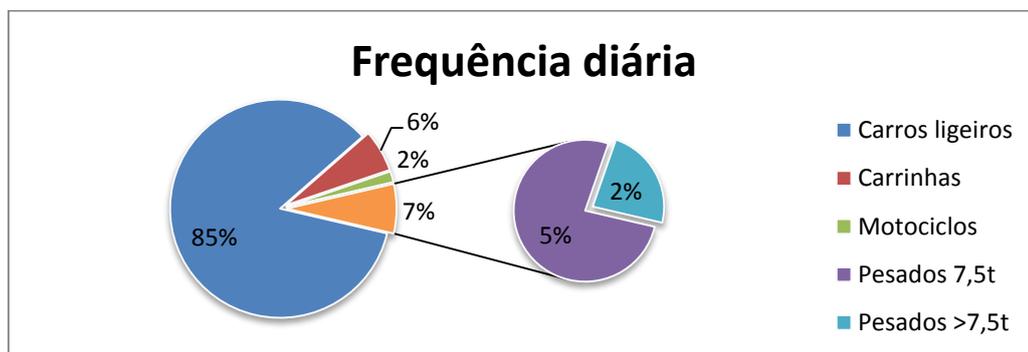


Figura 65: Distribuição do tráfego médio diário anual referente ao ano de 2008 (Relatório fornecido pela CMA, 2008)

O número de pesados para o período de dimensionamento de 10 anos corresponde a 2.89×10^6 vp, que corresponde a uma classe de tráfego T₄, segundo o MACOPAV. Considerou-se o eixos-padrão de 80 kN e obteve-se $1,30 \times 10^7$ eixos-padrão de dimensionamento.

6.6. Dimensionamento do Reforço

De acordo com as sondagens realizadas, pode-se assumir que a estrutura presente no troço em estudo é semelhante à estrutura da Figura 66, de acordo com o MACOPAV. Entre as camadas betuminosas e a camada granular existe uma camada de semipenetração, constituída por um agregado de grandes dimensões e ligado por uma rega betuminosa, porém verificou-se que o agregado não estava ligado, considerando-se, por isso, que esta camada é semelhante em termos de funcionamento às camadas granulares.

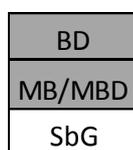


Figura 66: Estrutura tipo do troço (EP-JAE, 1995)

De salientar que a camada granular era de fraca qualidade, conforme se verificou através da observação visual e dos ensaios laboratoriais e a semipenetração era idêntica ao material composto pela camada granular, ou seja, também de fraca qualidade.

O dimensionamento será realizado em função da estrutura existente na zona F (sentido Hospital-Aradas) devido ao facto de se conhecer a sua estrutura e ser esta a que possui menor espessura betuminosa, ou seja, é a estrutura mais débil.

Para um solo de fundação, com um módulo de deformabilidade de 70 MPa, a classe de fundação é F₂.

6.6.1. Pré-Dimensionamento Através do Método das Espessuras Efetivas

Com base na Tabela 7, considerou-se um fator igual a 0.5 para as misturas betuminosas, visto estas estarem em muito mau estado, conforme se verificou através da inspeção visual. Para as camadas granulares (camada granular e semipenetração) optou-se por aplicar um fator de 0.1, embora talvez o mais adequado seria atribuir um fator de 0.0, pois a qualidade verificada não é a mais aconselhada para se aplicar nem em camada de base, nem em sub-base granular. Atribuindo estes fatores às respetivas camadas obteve-se $T_e \approx 6$ cm.

Com o módulo de deformabilidade do solo de fundação e sabendo o número de eixos-padrão, através do ábaco da Figura 28 advém $T_n \approx 37,5$ cm.

A espessura de reforço (T_0) corresponde aproximadamente a 32 cm, que resulta da subtração de T_e ao T_n .

6.6.2. Pré-Dimensionamento Através do MACOPAV

Com base no MACOPAV, realizou-se um pré-dimensionamento para o reforço, assumindo uma classe de fundação F₂ e uma classe de tráfego T₄ obtém-se um pavimento com 25 cm de misturas betuminosas e 20 cm de camada granular.

É necessário ter em atenção que a estrutura apresentada pelo MACOPAV, apresenta uma camada de sub-base constituída por materiais granulares. Para o pré-dimensionamento do reforço, apenas se consideram materiais betuminosos, pelo que é necessário converter o material granular em material betuminoso. Os 20 cm de material granular vão corresponder a aproximadamente 7 cm de material betuminoso (normalmente 3cm de material granular corresponde a 1cm de material betuminoso). Sendo assim, conclui-se que para uma classe de tráfego T₄ são necessários 32 cm de material betuminoso.

A espessura do reforço obtém-se através da diferença entre o material betuminoso necessário para uma estrutura nova e o material betuminoso equivalente à estrutura existente ($T_e \approx 6$ cm), assim sendo $T_0 \approx 26$ cm.

6.6.3. Dimensionamento Empírico-mecanicista da Shell

6.6.3.1. Avaliação da Estrutura Existente

Numa primeira fase avaliou-se a estrutura existente, para se perceber o estado desta, sabendo desde já que os resultados obtidos não seriam os melhores, devido à constituição e qualidade da estrutura.

O módulo de deformabilidade da camada granular e da semipenetração foram obtidos através das camadas subjacentes a estas, respetivamente, através de relações empíricas conforme descrito no subcapítulo 4.3.4..

A camada granular e a semipenetração eram de fraca qualidade, por este facto admitiu-se $K=1.5$, por ser o valor mínimo que assegura que a camada superior é mais rígida que a inferior.

A temperatura de serviço corresponde a $24,8^\circ$, referente à localidade de S. Jacinto, Aveiro.

Os módulos de deformabilidade obtidos são mencionados na Tabela 26.

Tabela 26: Módulo de deformabilidade da camada granular e semipenetração

Localização	Fundação	Camada granular			Semipenetração		
	E_{sf} (MPa)	$h_{camada\ granular}$ (m)	$K_{camada\ granular}$	$E_{camada\ granular}$ (Mpa)	$h_{semipen.}$ (m)	$K_{semipen.}$	$E_{semipen.}$ (Mpa)
Zona F	70	0,1	1,50	105,00	0,05	1,50	157,50

O peso volúmico dos agregados (γ_a) e a porosidade (n) das camadas de desgaste e regularização foram determinados a partir de parâmetros determinados em laboratório (Tabela 27 e Tabela 28). Como não se determinou a penetração a 25°C (pen_{25}) e a temperatura de amolecimento, considerou-se que as misturas betuminosas eram constituídas por betume 50/70, assim sendo, os parâmetros utilizados dizem respeito à média dos seus limites de acordo com as exigências de conformidade. O peso volúmico do betume (γ_b) considerou-se $1,03\text{ g/cm}^3$, visto ser um valor usual para a densidade dos betumes usados em Portugal.

Os valores da porosidade e dos pesos volúmicos dos agregados resultam da média dos valores das 6 amostras betuminosas ao longo da Avenida da Universidade, permitindo valores mais coerentes.

Tabela 27: Peso volúmico do betume e do agregado e porosidade da camada de desgaste

Características Gerais da mistura - Camada Desgaste							
Carote	BMT (g/cm ³)	Bt (g/cm ³)	Pb (%)	Pa (%)	γ_b (g/cm ³)	γ_a (g/cm ³)	n (%)
A	2,456	2,29	5,5	94,5	1,03	2,67	6,8
B	2,421	2,29	6,3	93,7	1,03	2,67	5,4
C	2,492	2,27	5,8	94,2	1,03	2,73	8,9
D	2,416	2,31	5,8	94,2	1,03	2,63	4,4
E	2,467	2,27	5,5	94,5	1,03	2,69	8,0
F	2,529	2,28	5,7	94,3	1,03	2,77	9,8
			5,8	94,2	1,03	2,69	7,2

Tabela 28: Peso volúmico do betume e do agregado e porosidade da camada de regularização

Características Gerais da mistura - Camada Regularização							
Carote	BMT (g/cm ³)	Bt (g/cm ³)	Pb (%)	Pa (%)	γ_b (g/cm ³)	γ_a (g/cm ³)	n (%)
B	2,586	2,22	4,6	95,4	1,03	2,79	14,2
E	2,505	2,08	6,0	94	1,03	2,76	17,0
F	2,387	2,26	7,3	92,7	1,03	2,66	5,3
			5,6	94,4	1,03	2,74	12

Com todos os parâmetros necessários verificou-se a percentagem de dano da estrutura existente, a estrutura da zona F (a zona mais problemática).

As verificações dos critérios de ruína do pavimento e os valores saídos do Bisar encontram-se no Anexo VI.

Como era esperado o número de eixo-padrão admissível (N_{adm}) é muito inferior ao número de eixo-padrão de dimensionamento (N_{dim}), originando uma dano enorme. Através da prospeção, dos ensaios laboratoriais, dos resultados obtidos nos métodos expeditos e no método empírico-mecanicista da Shell decidiu-se recorrer à reconstrução do pavimento.

6.6.3.2. Soluções para a Reconstrução

No âmbito deste trabalho serão apresentadas diversas soluções tradicionalmente aplicadas em pavimentos rodoviários. Todas as soluções foram dimensionadas pelo método empírico-mecanicista da Shell.

Os módulos de deformabilidade das misturas betuminosas foram determinados recorrendo à fórmula previsional da Shell. Alguns dados do estudo da formulação do betão betuminoso (AC 14 surf 35/50) e da mistura betuminosa densa (AC 20 reg 35/50) que são utilizadas na reconstrução encontram-se no Anexo VII. Já os módulos de deformabilidade da camada de base e sub-base granular foram determinados através das fórmulas empíricas, em função do módulo de deformabilidade do solo de fundação existente.

Um dos objetivos é a reciclagem do material *in situ*, nomeadamente o material granular, sendo uma prática cada vez mais comum devido a fatores ambientais. O material recuperado é tratado com ligante hidráulico, podendo ser aplicado em camadas de base ou sub-base, transformando a estrutura numa semirrígida. Selecionou-se a mistura solo-cimento (Sc) como solução para o material recuperado do pavimento, sendo o módulo de deformabilidade deste tipo de mistura, segundo o MACOPAV, de 2000 MPa, valor adotado para o dimensionamento.

As misturas tratadas com ligantes hidráulicos, tal como as misturas betuminosas, necessitam de verificar a tensão de tração na face inferior da camada. Para tal, recorreu-se à expressão (25) e determinou-se o N_{adm} que a camada suportava, cujo valor tem de ser sempre superior ao N_{dim} . Sempre que a camada tratada com ligante hidráulico não verificar essa condição, as soluções passam pelo aumento da espessura da camada Sc ou das camadas betuminosas.

Tabela 29: Valores adotados e respetiva metodologia de previsão dos módulos de deformabilidade

Material	Tipo de betume	E (MPa)	ν	Metodologia adotada (E)
BB	50/70	4740	0,35	Método previsional da Shell
BMD	50/70	4710	0,35	Método previsional da Shell
MBAM	10/20	11700	0,35	Método previsional da Shell
ABGE (em base granular)	-	325	0,35	Fórmulas empíricas
ABGE (em sub-base granular)	-	150	0,35	Fórmulas empíricas
Sc	-	2000	0,30	MACOPAV
Solo fundação	-	70	0,40	Ensaio experimentais

As estruturas simuladas para a reconstrução do novo pavimento são as seguintes:

- 1) BB em camada de desgaste, MBD em camada de regularização e Sc em sub-base;
- 2) BB em camada de desgaste, MBD em camada de regularização e ABGE em base e sub-base;

3) BB em camada de desgaste, MBD em camada de regularização, ABGE em base e Sc em sub-base;

4) BB em camada de desgaste, MBD em camada de regularização, Sc em base e ABGE em sub-base;

5) MBAM em camada de desgaste, MBD em camada de regularização e ABGE em base e sub-base.

A esquematização das soluções dimensionadas encontra-se no Anexo VIII.

Para o cálculo considerou-se uma fiabilidade do dano corresponde a 95%. As verificações dos critérios de ruína dos pavimentos, a estimativa dos módulos de deformabilidade das misturas betuminosas e os valores retirados do BISAR encontram-se no Anexo VI.

A utilização de revestimentos superficiais foi outra hipótese estudada, em vez do tradicional BB ou MBAM em camada de desgaste, optar-se pela utilização de um revestimento superficial. O objetivo desta solução é o melhoramento das características superficiais do pavimento.

Como estas técnicas pouco contribuem para a capacidade estrutural, não foram contabilizadas no dimensionamento. A título de exemplo dimensionou-se uma estrutura tradicional conforme a Figura 67, com microaglomerado betuminoso a frio em camada de desgaste.

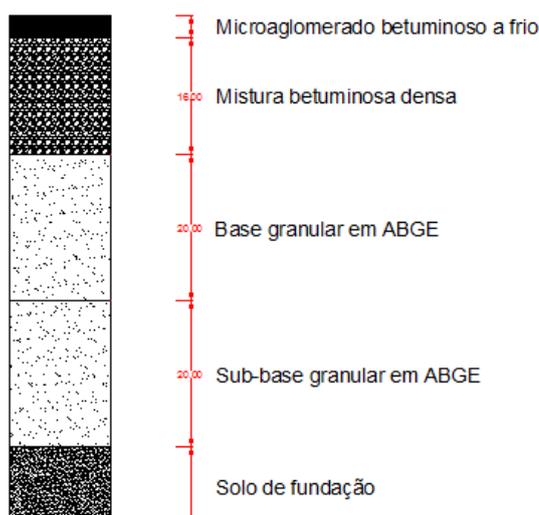


Figura 67: Estrutura com microaglomerado betuminoso a frio em camada de desgaste

Seguidamente serão mencionados alguns prós e contras das soluções anteriormente descritas.

Com utilização de solo-cimento em camada de sub-base pretende-se reutilizar os recursos existentes, através do tratamento destes com adição de ligante hidráulico, diminuindo desta forma a utilização de novos recursos. A reciclagem do material granular resolveria o grave problema de onde colocar o entulho originado pela demolição do pavimento.

A solução 1) foi subdividida em duas soluções. Numa colocou-se apenas a espessura recomendada pelo MACOPAV para as misturas betuminosas e a camada Sc tinha que possuir a espessura necessária para verificar os critérios de ruína dos pavimentos flexíveis, assim como a tração máxima na base da camada rígida. Na outra solução admitiu-se que a camada Sc possuía 20 cm de espessura e eram as camadas betuminosas que tinham de assegurar as verificações mencionadas na primeira solução.

Verificou-se que o critério mais condicionante era a tensão de tração máxima na base da camada Sc, por essa razão os danos dos critérios de fadiga e deformação permanente serem reduzidos, para salvaguardar a verificação da tensão de tração na base da camada tratada com cimento.

A introdução de uma camada rígida no pavimento, tornando este num pavimento semirrígido, promove grandes vantagens. Consegue-se garantir a resistência do pavimento com uma espessura total do conjunto (camadas granulares e betuminosas) inferior às soluções normalmente recorrentes e com facto de se manter as misturas betuminosas na camada de desgaste, garante-se as condições normais de segurança e conforto na circulação rodoviária.

A reduzida extensão do troço de pavimento em causa é um contra para a adoção desta técnica, não sendo viável a sua aplicação nestas condições. Todo o processo de transporte do material para a central, o tratamento e a adição de ligante hidráulico, e a possível adição de agregado torna este processo economicamente inviável, levando os donos de obra a optarem por outras soluções.

A solução 2) trata-se da estrutura mais recorrente na construção de novos pavimentos, a partir desta podemos comparar as restantes estruturas com a solução mais aplicada em Portugal.

O objetivo passou por ajustar a percentagem de um dos danos (dano à fadiga ou à deformação permanente) ao intervalo recomendado, entre 80 e 100%, de modo a que a estrutura não fique nem subdimensionada nem sobredimensionada.

Com a solução 3) e 4) pretende-se perceber como funciona o conjunto material granular/solo-cimento.

Na solução 3) colocou-se o Sc em sub-base e material granular em base, constatando-se que nesta solução a tensão de tração da base da camada tratada não era um problema, devido à profundidade a que esta se encontrava e sobretudo devido ao facto de existir uma camada sem capacidade resistente à tração (a camada constituída por material granular) entre as camadas betuminosas e o Sc. Logo, as tensões de tração eram absorvidas pelas camadas betuminosas.

Na solução 4) o Sc constitui a base e o material granular a sub-base, nesta estrutura devido ao facto do Sc se encontrar mais perto da superfície e ligado às camadas betuminosas constatou-se que o principal problema no dimensionamento foi garantir que o Sc verificasse a condição da tensão de tração da base da sua camada. Para assegurar essa condição foi necessário aumentar a espessura das camadas betuminosas, porém também se podia ter optado por aumentar a espessura da camada Sc.

Os resultados obtidos das duas soluções anteriores são semelhantes, as espessuras necessárias tanto para a solução 3) como para a solução 4) são idênticas. Na solução 3) é necessário uma espessura elevada de material betuminosa para se cumprir os critérios de ruína (dano à fadiga e dano à deformação permanente), enquanto na solução 4) esse acréscimo deve-se ao facto de a camada Sc não verificar o critério de ruína, em que o N admissível é inferior ao N de dimensionamento.

Na solução 5) utilizou-se uma mistura betuminosa de alto módulo em camada de desgaste, já que este tipo de material permite melhorar as características da mistura e reduzir a espessura a ser empregue.

A redução da espessura de reforço resulta do elevado módulo de deformabilidade que a mistura apresenta, porém poderá não ser a solução mais económica.

A solução 2) e 5) apenas diferem no material utilizado na camada de desgaste. A diferença de espessuras entre as soluções é de apenas 1 cm, portanto não é justificável a aplicação MBAM em camada de desgaste.

A solução em que se aplica um revestimento superficial em vez da tradicional camada de desgaste é semelhante à solução 2), em que tem de possuir a mesma espessura de camadas betuminosas para assegurar a verificação dos critérios de ruína. O tipo de mistura a utilizar será do tipo mistura betuminosa densa, visto que é aplicado um revestimento superficial com características idênticas ou melhoradas de um betão betuminoso.

6.7. Solução Adotada pelo Dono de Obra

6.7.1. Procedimento da Realização da Obra

O troço em estudo da Avenida da Universidade durante o mês de Setembro de 2013 foi submetido a obras, tendo o dono de obra optado, tal como previsto, pela reconstrução do pavimento.

O facto da reconstrução do troço em estudo ter decorrido durante a realização deste trabalho, permitiu a realização do seu acompanhamento. Com a finalidade de ter melhor perceção sobre a realização de pavimentos rodoviários e como parte integrante deste trabalho, realizou-se o acompanhamento de todas as fases da obra e, por fim, comparou-se as soluções estudadas com a aplicada em obra.

A primeira fase consistiu no desmonte do pavimento existente (Figura 68), onde a profundidade da escavação foi de aproximadamente 50 cm. Na Figura 68 a) é visível a reduzida espessura de material granular, com a presença de agregado de grandes dimensões, conforme a amostra que se obteve durante a prospeção. Realizou-se escavação em todo o troço e em ambas as faixas de rodagem.



a) Constituição do pavimento existente



b) Estado da estrada após a escavação

Figura 68: Realização da escavação do troço em estudo (fotografias de autor)

Após a realização da escavação colocou-se um geotêxtil com o principal objetivo de separar o pavimento das camadas subjacentes, protegendo as camadas de pavimento contra a subida de finos contaminantes (Figura 69).



a) Colocação do geotêxtil



b) Colocação e espalhamento do ABGE



c) Aspeto após a colocação da primeira camada de ABGE

Figura 69: Aplicação do geotêxtil e colocação da primeira camada de ABGE (fotografias de autor)

Por cima do geotêxtil foi colocada, espalhada e compactada uma camada com 15 cm de espessura de ABGE, referente à sub-base granular (Figura 69 b) e c)).

A segunda camada de ABGE (camada base granular), também com 15 cm de espessura, foi colocada sobre a camada sub-base granular. Após a execução desta fase (Figura 70) apenas restava cota suficiente para a aplicação das misturas betuminosas.



a) Colocação e espalhamento do ABGE



b) Aspeto após a colocação da segunda camada de ABGE

Figura 70: Colocação, espalhamento e aspeto final da segunda camada de ABGE (fotografias de autor)

Antes da aplicação da mistura betuminosa (camada de regularização), realizou-se uma rega de impregnação de emulsão betuminosa sobre o *tout-venant*, conforme a Figura 71, para permitir a ligação entre as duas camadas. A camada de mistura betuminosa foi aplicada sobre esta rega, com a espessura de 7 cm (Figura 72).



Figura 71: Rega de impregnação em betume fluidificado (fotografias de autor)

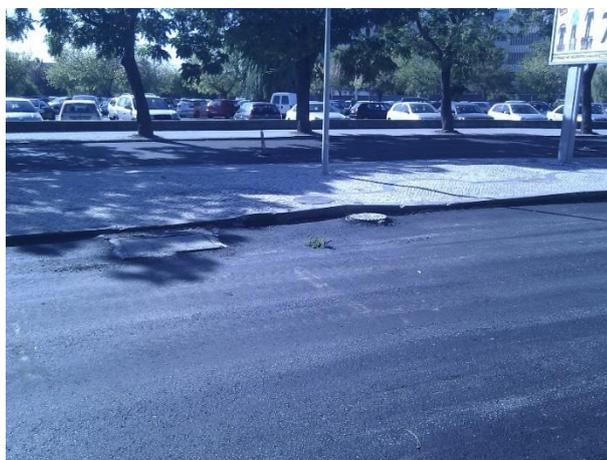


Figura 72: Aspeto após a colocação da mistura betuminosa densa (fotografia de autor)

A última camada betuminosa (betão betuminoso) é aplicada sobre a camada de mistura betuminosa densa. A ligação entre a camada de desgaste e a camada de regularização realizou-se através de uma rega de colagem com emulsão catiónica de rotura rápida.



Figura 73: Aspeto após a aplicação do betão betuminoso (fotografias de autor)

6.7.2. Verificação da Solução Adotada

A solução aplicada no troço em estudo da Avenida da Universidade é composta por 2 camadas de material granular (ABGE) com a espessura de 15 cm, uma camada de mistura betuminosa densa com 7 cm e como camada de desgaste optaram por aplicar 5 cm de betão betuminoso, conforme a ilustração da Figura 74.

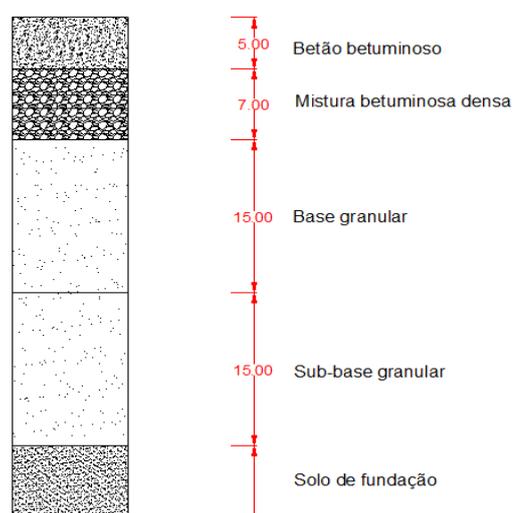


Figura 74: Solução aplicada na reconstrução do troço

A viabilidade da solução adotada pelo dono de obra foi verificada através do método empírico-mecanicista da Shell, em que as ações foram as mesmas que as anteriormente adotadas para o dimensionamento das soluções sugeridas. A formulação das misturas betuminosas (betão betuminoso e mistura betuminosa densa) utilizadas encontram-se no Anexo VII e os restantes parâmetros foram determinados conforme os procedimentos anteriores.

Os resultados obtidos através do método da Shell encontram-se no Anexo VI e, de acordo com as ações e parâmetros utilizados, não verifica os critérios de ruína.

6.8. Controlo de Qualidade da Mistura Betuminosa Adotada

As misturas betuminosas (AC 20 REG 35/50 e AC 14 SURF 35/50) usadas na solução adotada foram submetidas ao controlo de qualidade.

O relatório de verificação de conformidade das misturas betuminosas anteriormente referidas foi efetuado de acordo com o caderno de encargos da Estradas de Portugal, segundo o capítulo 14.03.2.3.2 e 14.03.2.4.1, alusivo ao mês de Fevereiro de 2009.

No betão betuminoso, o parâmetro de Marshall-deformação não está conforme o caderno de encargos, porém o valor da deformação está muito próximo do intervalo recomendado, podendo-se aceitar a sua aplicação.

O relatório de conformidade encontra-se no Anexo IX e entende-se que as misturas estão de acordo com o caderno de encargos da Estradas de Portugal, alusivo ao mês de Fevereiro de 2009. Assim sendo, sugere-se a aceitação da sua implementação.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

A rede rodoviária Nacional desempenha um papel fundamental no desenvolvimento e crescimento do País. Uma rede rodoviária bem estruturada permite a mobilidade rápida de pessoas e mercadorias, porém esta mobilidade só se realiza eficazmente quando as estradas apresentam condições de conforto, economia e segurança.

Como qualquer infraestrutura, os pavimentos rodoviários com o passar do tempo começam a sofrer alterações ao nível da superfície e da estrutura, devido sobretudo às cargas introduzidas pelo tráfego pesado e pelas ações climáticas. Com o passar do tempo surgem na superfície do pavimento patologias, que contribuem para a perda precoce da capacidade de carga estrutural e para a redução da qualidade das características funcionais do pavimento.

De forma a evitar situações de ruína, deve-se avaliar sistematicamente o pavimento, quer ao nível das características superficiais, quer ao nível das características estruturais, com o objetivo de se observar alterações relevantes e, deste modo, intervir no momento certo e da forma mais correta. As medidas aplicadas devem recuperar as características iniciais, de forma a prolongar a vida útil do pavimento rodoviário.

O estado do troço de estudo da Avenida da Universidade era preocupante, a existência de diversas degradações com os níveis de gravidade máximos revelava a necessidade de intervenção ao nível da camada de desgaste. Os resultados do Índice de Qualidade vieram reforçar a necessidade de intervenção, sendo que o troço no sentido norte-sul, os últimos 100m apresentava um IQ de 1,54. O Índice de Qualidade global apontava para a necessidade de intervenção do troço ao nível da camada de desgaste.

De maneira a se obter mais dados sobre o troço em estudo, realizou-se uma campanha de sondagens, mais propriamente uma carotagem e um poço de prospeção, que permitiu conhecer a estrutura existente, assim como o tipo e qualidade dos materiais que a constituíam.

As camadas subjacentes às camadas betuminosas eram de fraca qualidade, a camada de semipenetração não apresentava coesão e a camada granular era de péssima qualidade, com vestígios de contaminação oriunda do solo de fundação.

Com o recurso a ensaios laboratoriais foi possível caracterizar cada um dos materiais e determinar alguns parâmetros necessários para se proceder ao cálculo do reforço.

A camada granular apresentava reduzida espessura e agregados de grandes dimensões, o que impossibilitou a realização da análise granulométrica, devido ao facto de ter sido necessário fraturar alguns desses agregados para conseguir extrair a amostra, esta foi adulterada e, para além disso, apresentava contaminação, conforme se verificou através do equivalente de areia.

Com base nos resultados da análise granulométrica e nos limites de consistência, classificou-se o solo de fundação como sendo um A-1-b (0), segundo a especificação E 240. A classificação atribuída indica um solo com bom comportamento, não sendo necessário melhorar o solo de fundação ou criar uma camada de leito de pavimento com melhores características.

Em função do CBR do solo de fundação determinou-se os módulos de deformabilidade das camadas sobrejacente (camada granulares), através das fórmulas empíricas.

Os resultados obtidos da baridade aparente e da baridade máxima teórica das misturas betuminosas são valores aceitáveis para este tipo de mistura. Os teores de betume da camada de desgaste correspondem a valores normalmente adotados, enquanto os valores do teor de betume da camada de regularização estão ligeiramente elevados, pois normalmente a mistura betuminosa densa possui percentagens de betume compreendidas entre 5-5,5%.

A curva granulométrica dos agregados que constituíam o betão betuminoso não está compreendida no fuso granulométrico das camadas de mistura betuminosa a quente com características de desgaste, recomendado pelo Caderno de Encargos da Estradas de Portugal de Janeiro de 2012. A verificação da análise granulométrica através deste Caderno de Encargos não é o procedimento mais correto, pois na altura que foi empregue a mistura betuminosa o Caderno de Encargos em vigor era outro.

A determinação do número admissível de eixos-padrão de 80 kN foi segundo o MAVOPAV, para 10 anos de dimensionamento, como novo período de vida útil para a solução adotada.

O dimensionamento do reforço contempla várias metodologias, sendo as expeditas normalmente usadas para estudos prévios, mas desatualizadas com a realidade atual. Contudo realizou-se o cálculo do reforço necessário através do método das espessuras efetivas e do MACOPAV, com a finalidade de se perceber se era possível realizar reforço em vez da reconstrução.

As metodologias de dimensionamento de reforço/reconstrução usadas em Portugal correspondem a processos empírico-mecanicistas que avaliam o estado tensão-deformação dos materiais em pontos críticos. Através do método da Shell calculou-se a dano de fadiga e da deformação permanente do pavimento existente, obtendo-se valores exageradíssimos.

Com base na informação anterior decidiu-se reconstruir o pavimento, com o objetivo de restituir as condições de serviço do pavimento que se encontrava no estado de ruína estrutural.

A necessidade de criar uma nova estrutura onde as camadas betuminosas assentassem levou à reconstrução do pavimento. Um dos objetivos é a reutilização do material granular existente com adição de ligante hidráulico, nomeadamente cimento, de modo a se obter uma estrutura mais resistente. A camada de solo-cimento tem módulos de deformabilidade muito superiores ao tradicional *tout-venant*, permitindo reduzir significativamente a espessura total do pavimento.

As misturas betuminosas utilizadas na reconstrução do pavimento são o tradicional betão betuminoso e a mistura betuminosa densa. Dimensionou-se uma estrutura com mistura betuminosa de alto módulo para se comparar com uma estrutura idêntica mas com betão betuminoso, verificando-se que o facto de a MBAM possuir um módulo de deformabilidade muito superior ao betão betuminoso não se traduz na redução da espessura, poupando-se apenas 1cm de material betuminoso, por isso não é viável a sua aplicação.

O estado tensão-deformação nos pontos críticos foi determinado através do programa de cálculo automático BISAR, retirando as extensões nos pontos críticos necessárias para se proceder aos cálculos das soluções de reconstrução pela metodologia empírico-mecanicista da Shell, assim como verificar a tensão de tração presente na base da camada solo-cimento.

A tensão de tração atuante na base da camada solo-cimento é inversamente proporcional à sua espessura, quanto maior for a sua espessura menor será a tensão de tração atuante.

Através das soluções dimensionadas constatou-se que as estruturas com maior espessura de camadas ligadas (camadas betuminosas e solo-cimento) comportam-se melhor face às solicitações que originam as tensões de tração, traduzindo-se num dano de fadiga reduzido.

A utilização de solo-cimento pode ser economicamente inviável, mas pode passar a ter viabilização através de um decréscimo dos custos de produção, associado a um maior volume de empreitadas de reabilitação a colocar em concurso este tipo de técnicas.

A necessidade de respeitar alguns fatores ambientais pode passar pela obrigatoriedade de nas obras públicas se usar uma determinada percentagem de materiais recicláveis, a limitação do recurso a vazadouros e/ou a limitação da utilização de novos materiais.

Este estudo possibilitou o acompanhamento de todo o processo construtivo, desde o desmonte do pavimento existente à colocação de cada camada que constitui o novo pavimento. Tendo-se constituído como uma excelente oportunidade de implementação de um caso prático, teoricamente desenvolvido.

O dono de obra, conforme era aconselhável, optou pela reconstrução de um novo pavimento. A solução adotada consiste na aplicação de 2 camadas de *tout-venant*, mistura betuminosa densa em camada de regularização e betão betuminoso em camada de desgaste.

A solução que foi adotada é a mais utilizada em Portugal, e em função dos dados utilizados para as soluções propostas neste trabalho (número eixos-padrão, módulos de deformabilidade das camadas granulares e das misturas betuminosas), verificou-se a sua viabilidade.

A viabilidade da solução foi verificada através do método da Shell, obtendo-se tanto para o dano de fadiga como para o dano da deformação permanente valores que indicam que a estrutura está subdimensionada. Contudo, estes valores são uma estimativa, pois não se conhece ao certo os valores exatos dos módulos de deformabilidade utilizados nem o número de eixo-padrão adotado.

A solução aconselhável, de acordo com este trabalho, seria a aplicação de 20cm de ABGE em camada sub-base, 20cm de ABGE em camada de base, 10cm de mistura betuminosa densa em camada de desgaste e 6cm de betão betuminoso em camada de desgaste.

A aplicação do solo-cimento não é aconselhável pelas razões já mencionadas e pelo facto de se tratar de um troço de pequena extensão, que economicamente não é tão viável como se tratasse de um troço com uma maior extensão.

Para finalizar realizou-se o controlo de qualidade das misturas betuminosas aplicadas nas soluções propostas, para assegurar o cumprimento do caderno de encargos.

Em suma, conclui-se que não há soluções ideais, mas sim soluções viáveis. Cada pavimento tem o seu comportamento, as suas características mecânicas, sendo que a solução de

reabilitação passará por aquela que se enquadra melhor nos fatores económicos, técnicos e ambientais.

Quanto a futuros trabalhos recomenda-se fortemente este tipo de abordagem, aplicações teórico-práticas abordadas noutras situações de obra.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO, 1986. *AASHTO Guide for Design of Pavement Structures*. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington D. C., USA.
- AI, 1983. *Asphalt Overlays for Highway and Street Rehabilitation*. Asphalt Institute, Manual series nº 17 (MS-17), Maryland.
- Alves, T.S.F., 2007. *Metodologias de auscultação de pavimentos rodoviários - Aplicação prática do Radar de prospecção e do Deflectómetro de impacto*. Dissertação para obtenção de grau de Mestre em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.
- Antunes, M. de L., 1993. *Avaliação “in-situ” das condições de fundação dos pavimentos rodoviários com base em ensaios de carga*. Tese de Doutoramento, Laboratório de Engenharia Civil e Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Antunes, M. de L., 2005. *Conservação e Reabilitação de Pavimentos Rodoviários*. Apontamentos do curso de formação promovido pelo Fundec-LNEC, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
- Antunes, M. de L., Batista, F. & Fonseca, P., 2006. *A homologação de misturas betuminosas com betume modificado com borracha*. Artigo apresentado no IV congresso rodoviário Português.
- ASTM, 1995. ASTM D 2172-95: *Standart test for Quantitative Extraction of Bitumen From Bituminous Paving Mixtures*. Vol. 4.03, Road and Paving Materials; Vehicle-Pavement Systems, Annual Book of ASTM Standards, West Conshohocken, Pensilvânia, Estados Unidos.
- Azevedo, M. da C., 2012. *Construção e Reabilitação de Pavimentos - Ligantes Betuminosos*. Trabalho realizado para o InIR pela empresa CAeMD, Instituto de Infra-Estruturas Rodoviárias.
- Baptista, A., 1999. *Dimensionamento de Pavimentos Rodoviários Flexíveis: Aplicabilidade em Portugal dos Métodos Existentes*. Dissertação para obtenção de grau de Mestre em Engenharia Urbana, Universidade de Coimbra.
- Baptista, A., 2006. *Misturas betuminosas Recicladas a Quente em Central - contribuição para o seu estudo e aplicação*. Dissertação para obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Civil em Urbanismo, Ordenamento do Território e Transportes, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Batista, F.A., 2005. *Conservação e Reabilitação de Pavimentos Rodoviários - Novas Técnicas de Reabilitação de Pavimentos*. Apontamentos da disciplina Pavimentos Rodoviários, Instituto Superior Técnico, Lisboa.

- Batista, F.A., 2004. *Novas técnicas de reabilitação de pavimentos - misturas betuminosas densas a frio*. Dissertação para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto.
- Benta, A., 2012. *Apontamentos das aulas de Conservação e Reabilitação de Pavimentos*. Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro, Aveiro.
- Benta, A., 2008. *Apontamentos das aulas de Conservação e Reabilitação de Pavimentos*. Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro, Aveiro.
- Branco, F., Pereira, P. & Santos, L.P., 2006. *Pavimentos Rodoviários*. Edições Almedina, Coimbra.
- CAeMD, *Directivas para a Concepção de Pavimentos - Critérios de Dimensionamento*. Trabalho realizado para o InIR pela empresa CAeMD, Instituto de Infra-Estruturas Rodoviárias.
- CEN, 2002. *Test methods for hot mix asphalt - Part 5: Determination of the maximum density* (EN 12697-5).
- CEPSA, 2006. *Manual de Pavimentação*, Lisboa.
- Claessen, A., Edwards, J., Sommer, P., Ugé, P., 1977. *Asphalt Pavement Design Manual: the SHELL Method*, Proceedings of 4th International Conference on Structural Design of Asphalt Pavements, University of Michigan.
- CM, 2009. *Construção Magazine. Revista Técnico-Científica Engenharia Civil n°29*, Porto.
- Costa, H., 2008. *Análise de Custos de Ciclo de Vida Relativa a Pavimentos Rodoviários Flexíveis*. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.
- David, D., 2006. *Misturas Asfálticas Recicladas a Frio: Estudo em laboratório utilizando emulsão e agente de reciclagem emulsionado*. Dissertação apresentada ao programa de pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Decreto-Lei n°222/98 de 17 de Julho* de 1998. Diário da República n° 163/98 – I Série A. Ministério do Equipamento, do Planeamento e da Administração do Território. Lisboa.
- Dias, J.P.M., 2009. *Estudo de Reforço do Pavimento Rodoviário da EN 333-3 entre a A25 e Oliveira de Frades*. Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil na Especialidade de Urbanismo, Transportes e Vias de Comunicação, Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Domingos, P., 2007. *Reforço de Pavimentos Rígidos - Modelação do Comportamento Estrutural*. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Transportes, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.
- EP-JAE, 2006. *Catálogo de Degradações dos Pavimentos Rodoviários*. Volume 2, Gestão da Conservação, EP - Estradas de Portugal S.A., Lisboa.

-
- EP-JAE, 1995. *Manual de Concepção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional (MACOPAV)*. EP - Estradas de Portugal S.A., Lisboa.
- Estradas de Portugal, 2008. *Catálogo de Degradações dos Pavimentos Flexíveis*. Volume 1: Projecto de Reabilitação, Gabinete de Gestão da rede, EP - Estradas de Portugal S.A., Lisboa.
- Estradas de Portugal, 2012. *Caderno de Encargos Tipo Obra*. Capítulo 14.03-Pavimentação, Características dos Materiais, EP - Estradas de Portugal S.A., Lisboa.
- Eugénio, B.M.A., 2008. *Reforço de Pavimentos*. Relatório de projeto submetido para satisfação parcial dos requisitos do Grau de Mestre em Engenharia Civil - Especialização em Vias de Comunicação, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto.
- Fontul, S., 2004. *Structural Evaluation of Flexible Pavements Using Non-Destructive Tests*. Tese de Doutoramento, Lisboa.
- Francisco, A.S., 2012. *Comportamento Estrutural de Pavimentos Rodoviários Flexíveis*. Relatório Final de Projeto apresentado para obtenção do grau de Mestre em Engenharia da Construção, Instituto Politécnico de Bragança, Bragança.
- Geofoco, 2013. Geofoco. Disponível em : <http://geofoco.com.br/>.
- Huenker, 2009. Huenker. Disponível em : <http://www.huesker.es/>.
- IPQ, 2000. *Ensaio das propriedades geométricas dos agregados, Parte 1: Análise granulométrica - Método de peneiração (NP EN 933-1)*. Instituto Português da Qualidade, Lisboa.
- IPQ, 2002. *Ensaio das propriedades geométricas dos agregados, Parte 8: Determinação do teor de finos - Equivalente de areia (EN 933-8)*. Instituto Português da Qualidade, Lisboa.
- IPQ, 2010. *Métodos de ensaio para misturas betuminosas a quente, Parte 6: Determinação da baridade de provetes betuminosos (NP EN 12697-6)*. Instituto Português da Qualidade, Lisboa.
- IPQ, 1969. *Solos - Determinação dos limites de consistência (NP-143)*. Instituto Português da Qualidade, Lisboa.
- ISO/TS 17892-6, 2004. Geotechnical investigation and testing - Laboratory testing of soil - Part 6: Fall cone test. International Organization for Standardization.
- Jacinto, M.A.S.C., 2003. *Caracterização estrutural de pavimentos*. Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Vias de Comunicação, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto.
- LNEC, 2005. *Conservação e Reabilitação de Pavimentos Rodoviários*. Laboratório de Engenharia Civil, Lisboa.

- LNEC, 1966. *Solos: Análise Granulométrica* (E 196). Laboratório de Engenharia Civil, Lisboa.
- LNEC, 1970. *Solos: Classificação para fins Rodoviários* (E 240). Laboratório de Engenharia Civil, Lisboa.
- LNEC, 1967a. *Solos: Determinação do CBR* (E 198). Laboratório de Engenharia Civil, Lisboa.
- LNEC, 1967b. *Solos: Ensaio de Compactação* (E 197). Laboratório de Engenharia Civil, Lisboa.
- Marques, J.A., 1999. *Reciclagem in situ*. Acção de formação: As emulsões betuminosas e suas aplicações, Lisboa.
- Martinho, F., 2005. *Reciclagem de pavimentos - Estado da Arte, Situação Portuguesa e Selecção do processo Construtivo*. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Minhoto, M., 2005. *Consideração da temperatura no Comportamento à reflexão de Fendas dos reforços de Pavimentos Rodoviários Flexíveis*. Dissertação de Doutoramento em Engenharia Civil, Universidade do Minho, Braga.
- Morais, H.M.M., 2011. *Estudo da fundação dum pavimento rodoviário flexível*. Relatório Final de Projecto para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia da Construção, Instituto Politécnico de Bragança, Bragança.
- Moreira, J.P., 2005. *Contribuição para a reutilização de material fresado em camadas estruturais de pavimento*. Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Rodoviária, Universidade do Minho, Braga.
- Neves, J., 2010. *Concepção e dimensionamento de pavimentos, Parte 2: Reabilitação de pavimentos- Caracterização da situação existente*. Apontamentos da disciplina Pavimentos Rodoviários, Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Neves, J., 2001. *Contribuição para a Modelação do Comportamento Estrutural de Pavimentos Rodoviários Flexíveis*. Dissertação de Doutoramento, Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- O'Flaherty, C.A., 1998. Highway Engineering. , Terceira Edição, Volume 2.
- Pais, J., Pereira, P. & Azevedo, M., 2000. *A reflexão de fendas no dimensionamento de reforços de pavimentos flexíveis*. 1º Congresso Rodoviário Português - Estrada 2000, Lisboa.
- Pais, J.C., 1999. *Consideração da Reflexão de Fendas no Dimensionamento de Reforços de Pavimentos Rodoviários*. Universidade do Minho, Braga.
- Pereira, P. & Miranda, C., 1999. *Gestão de Conservação de Pavimentos*. Universidade de Braga, Braga.

- Picado-Santos, L., Ferreira, A. & Pereira, P., 2006. *Estruturação de um sistema de Gestão de Pavimentos para uma Rede Rodoviária Nacional*. Universidade do Minho, Braga. *Revista Engenharia Civil*, N° 26, pp.45–59.
- Pinto, J.I.B., 2003. *Caracterização Superficial de Pavimentos Rodoviários*. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Vias de Comunicação, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.
- PTC, 2005. *Interactive Training Guides - Pavement Tools Consortium*. University of Washington, Washington, United States of America, <http://training.ce.washington.edu/>.
- Quaresma, L.M., 1992. *Estudos relativos a pavimentos semi-rígidos. Dimensionamento e observação*. LNEC. Lisboa.
- Santos, B., 2009. *Bases Granulares de Agregado Reciclados*. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, Universidade de Aveiro, Aveiro.
- Santos, M.J.L., 2009. *Dimensionamento de camadas de reforço de pavimentos rodoviários flexíveis*. Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, Universidade de Aveiro, Aveiro.
- SHELL, 1977. *Asphalt pavement design manual*. Shell International Petroleum Company, London.
- Silva, H.M.R.D., 2005. *Caracterização do Mastique Betuminoso e da Ligação Agregado-Mastique. Contribuição para o Estudo do Comportamento das Misturas Betuminosas*. Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Braga.
- Specht, L.P., 2004. *Avaliação de misturas betuminosas asfálticas com incorporação de borracha reciclada de pneus*. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil.
- Teixeira, A., Rodrigues, R., Azevedo, M., 2003. *Betume espuma - 1ª Experiência em Portugal*. II Jornadas de Pavimentos Rodoviários - Reciclagem, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.
- Vale, C.M.N.A.S. do, 2004. *Comportamento Estrutural de Pavimentos Rodoviários Flexíveis - Contributos para a modelação*. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.
- Vicente, A.M., 2006. *A utilização de Betumes Modificados com Borracha na Reabilitação de Pavimentos Flexíveis*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.
- Visser, A. & Verhaeghe, B., 2000. *Bitumen-rubber: Lessons learnt in South Africa*. Asphalt Rubber 2000.
- Wirtgen, 2001. *Wirtgen cold recycling manual - 2nd revised issue*, Windhagen