

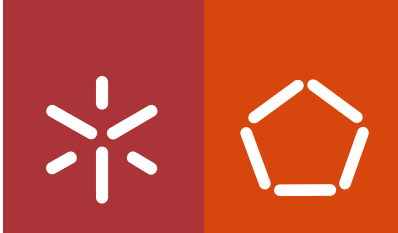


Universidade do Minho
Escola de Engenharia

João Paulo da Costa Araújo

**Avaliação da sustentabilidade de
estruturas e materiais de pavimentos
rodoviários**

João Paulo da Costa Araújo **Avaliação da sustentabilidade de estruturas
e materiais de pavimentos rodoviários**



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

João Paulo da Costa Araújo

**Avaliação da sustentabilidade de
estruturas e materiais de pavimentos
rodoviários**

Tese de Doutoramento em Engenharia Civil

Trabalho efetuado sob a orientação do

Professor Doutor Joel Ricardo Martins de Oliveira

e do

Professor Doutor Hugo Manuel Ribeiro Dias da Silva

junho de 2016

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

João Paulo da Costa Araújo, autor da presente Tese, declara ter atuado com integridade na sua elaboração. Confirma que em todo o trabalho conducente à sua elaboração não recorreu à prática de plágio ou a qualquer forma de falsificação de resultados.

Mais declara que tomou conhecimento integral do Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

Universidade do Minho, 6 de junho de 2016

Assinatura: João Paulo Costa Araújo



“Nós não herdamos a Terra dos nossos antepassados,
pedimos emprestada aos nossos filhos.”

(Provérbio Índio)

AGRADECIMENTOS

A concretização deste trabalho resulta da conjugação de diversos meios e vontades que o tornaram possível. Não posso, por isso, deixar de expressar os meus sinceros agradecimentos a todos aqueles que de alguma forma contribuíram para a sua realização.

Aos meus orientadores, os Professores Joel Oliveira e Hugo Silva, agradeço a orientação, o apoio e todos os ensinamentos que me transmitiram, bem como a boa disposição que nunca deixaram que faltasse, tornando o trabalho ainda mais agradável e ajudando a superar as dificuldades que surgiam.

Ao Professor Jorge Pais, primeiro e grande responsável pela minha entrada neste projeto, bem como a todo o grupo de investigação em Sistemas e Infraestruturas de Transporte do Centro de Território, Ambiente e Construção da Universidade do Minho, agradeço o apoio e os meios que sempre colocaram à minha disposição, nunca permitindo que me faltassem condições para a prossecução dos objetivos traçados.

Ao Professor Francisco Martins, pela preciosa colaboração na análise dos resultados com as técnicas de *Data Mining*, bem como pela disponibilidade sempre imediata para esclarecer qualquer dúvida.

Ao Engenheiro Carlos Palha, técnico do Laboratório de Pavimentos, por toda a dedicação demonstrada a este projeto. Se ele, melhor que ninguém, conhece as dificuldades com que nos deparamos na componente experimental, também eu, melhor que ninguém, sei o quanto ele foi decisivo para a sua resolução. Mais do que um profissional competente, o Palha foi um amigo dedicado, a quem deixo um agradecimento especial.

Às empresas de construção CJR – Cândido José Rodrigues, S.A. e Gabriel Couto, S.A. agradeço a amabilidade demonstrada, em especial no apoio ao desenvolvimento da parte experimental desta Tese.

À empresa Freitas e Freitas Lda., na pessoa do seu sócio-gerente, o Sr. Domingos Freitas, e ao Professor Jaime Fonseca, do Departamento de Eletrónica Industrial da Universidade do Minho, pela conjugação de saberes e colaboração demonstrada na resolução dos problemas práticos que iam surgindo, normais à construção de um equipamento novo.

Ao “pessoal do laboratório” de uma forma geral e, às Lilianas, à Sara, à Daniela, ao Hélder, ao Zé Pedro e à Andreia, de uma forma particular, pela colaboração, amizade e coragem sempre demonstradas e, sobretudo, pelo bom ambiente que dão àquele lugar.

Por fim, e só porque os últimos são os primeiros, aos meus pais. Porque sempre foram e continuarão a ser os alicerces da pessoa em que me vou tornando, agradeço-lhes por tudo, desde a educação, a compreensão, o carinho e o apoio incondicional que sempre deram às minhas escolhas. A sorte conquista-se, mas a bênção de vos ter como pais, essa foi-me oferecida...

AVALIAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE DE ESTRUTURAS E MATERIAIS DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS

RESUMO

A noção de que os recursos que a humanidade tem usado são limitados tem levado à implementação de práticas mais sustentáveis. Dado que os pavimentos rodoviários são infraestruturas cuja construção, utilização e reabilitação provoca impactos ambientais consideráveis, torna-se indispensável a procura de novas técnicas e processos mais sustentáveis, com vista à mitigação das suas consequências. Além disso, importa perceber que os efeitos dos pavimentos rodoviários não se limitam ao período em que são construídos, mas prolongam-se durante toda a sua vida. No entanto, as metodologias de análise do ciclo de vida propostas até agora concentram-se demasiado nas fases de extração, produção, transporte e aplicação dos materiais, o que é insuficiente para estudar todo o período de vida do pavimento.

Nesse sentido, pretende-se com este trabalho desenvolver uma metodologia de análise da sustentabilidade dos diferentes materiais e estruturas de pavimentos que inclua também o período de utilização dos pavimentos, considerando para tal, as operações de conservação dos pavimentos ao longo do ciclo de vida e estimativas do consumo de combustível, baseadas na resistência ao rolamento.

Para avaliar a resistência ao rolamento, desenvolveu-se um protótipo capaz de determinar as diferenças de consumo de energia provocadas por diferentes superfícies de pavimentos. Os dados obtidos experimentalmente foram depois analisados através de técnicas de *Data Mining*, e considerados na nova metodologia de análise da sustentabilidade desenvolvida neste trabalho, através de um caso de estudo que incluiu a utilização de diferentes estruturas de pavimentos e cenários/estratégias de conservação.

Os resultados obtidos confirmam a preponderância da fase de utilização dos pavimentos, quer em termos de impacto ambiental, quer em termos económicos, na avaliação do seu ciclo de vida, confirmando a importância da sua consideração nesse tipo de análises.

PALAVRAS-CHAVE

Sustentabilidade, Análise do Ciclo de Vida, Resistência ao Rolamento, Consumo de Combustível, Pavimentos Rodoviários, Técnicas de Conservação, Características Superficiais, *Data Mining*.

SUSTAINABILITY ASSESSMENT OF STRUCTURES AND MATERIALS OF ROAD PAVEMENTS

ABSTRACT

The idea that the resources people have used are limited has led to the implementation of more sustainable practices. Being road pavements infrastructures that cause significant environmental impacts during their construction, use and rehabilitation stages, it is essential to search for new techniques and more sustainable processes for the mitigation of their consequences. Furthermore, it is important to realize that the effects of road pavements are not limited to the period in which they are constructed, but extended throughout their lifetime. However, the life cycle methodologies proposed so far are too much focused on resource extraction, production, transportation and material application, which is insufficient to study the entire life cycle of the pavement.

Thus, the aim of this work was to develop a methodology for analyzing the sustainability of different materials and pavement structures that also include the pavements' use phase, taking the conservation operations of the pavements throughout the life cycle and estimates of the fuel consumption, based on the rolling resistance, into consideration.

To evaluate the rolling resistance a prototype capable of determining the energy consumption differences caused by different pavement surfaces was developed. The experimental data were then analyzed through Data Mining techniques, and considered in the new sustainability analysis methodology developed in this work through a case study involving the use of different pavement structures and conservation scenarios/strategies.

The results confirm the preponderance of the pavements' use phase, both in terms of economic and environmental impact, in the assessment of their life cycle, confirming the importance of their consideration in this type of analysis.

KEYWORDS

Sustainability, Life Cycle Assessment, Rolling Resistance, Fuel Consumption, Road Pavements, Maintenance Technologies, Surface Characteristics, Data Mining.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	vii
RESUMO	ix
PALAVRAS-CHAVE	ix
ABSTRACT	xi
KEYWORDS	xi
ÍNDICE GERAL.....	xiii
ÍNDICE DE TEXTO	xv
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xxiii
ÍNDICE DE QUADROS.....	xxix
SIMBOLOGIA.....	xxxi
Capítulo 1 INTRODUÇÃO	1
Capítulo 2 PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS	7
Capítulo 3 SUSTENTABILIDADE DOS PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS.....	41
Capítulo 4 DESENVOLVIMENTO DE UMA METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DOS PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS	71
Capítulo 5 DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO PARA AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO ROLAMENTO	87
Capítulo 6 CARACTERIZAÇÃO DAS SUPERFÍCIES DOS TRECHOS E DAS MISTURAS A UTILIZAR NO ESTUDO DOS PAVIMENTOS.....	101
Capítulo 7 AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DA RESISTÊNCIA AO ROLAMENTO.....	137
Capítulo 8 ANÁLISE DA SUSTENTABILIDADE DE DIFERENTES ESTRUTURAS DE PAVIMENTOS.....	161
Capítulo 9 CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....	199
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	205
ANEXOS	221

ÍNDICE DE TEXTO**Capítulo 1****INTRODUÇÃO**

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Enquadramento.....	1
1.2. Objetivos e metodologia.....	2
1.3. Organização da Tese	3

Capítulo 2**PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS**

2. PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS	7
2.1. Considerações gerais sobre pavimentos.....	7
2.2. Tipos de pavimentos.....	8
2.2.1. Pavimentos flexíveis.....	8
2.2.2. Pavimentos rígidos	9
2.2.3. Pavimentos semirrígidos	10
2.3. Materiais utilizados nos pavimentos	10
2.3.1. Materiais para camadas não ligadas	10
2.3.2. Agregados	11
2.3.3. Ligantes betuminosos	11
2.3.4. Ligantes hidráulicos.....	14
2.3.5. Água	14

2.4.	Misturas aplicadas nas camadas ligadas do pavimento	15
2.4.1.	Misturas com ligantes betuminosos	15
2.4.2.	Misturas com ligantes hidráulicos	21
2.5.	Caracterização e fabrico de misturas com ligantes betuminosos	23
2.5.1.	Caraterísticas das misturas com ligantes betuminosos	23
2.5.2.	Fabrico de misturas com ligantes betuminosos	25
2.6.	Métodos de dimensionamento de pavimentos.....	26
2.6.1.	Dimensionamento de pavimentos flexíveis	26
2.6.2.	Dimensionamento de pavimentos rígidos	31
2.6.3.	Dimensionamento de pavimentos semirrígidos.....	31
2.7.	Técnicas de construção e reabilitação de pavimentos rodoviários flexíveis	32
2.7.1.	Colocação em obra de misturas betuminosas	32
2.7.2.	Técnicas de reabilitação de pavimentos rodoviários.....	34
2.8.	Reciclagem de pavimentos rodoviários.....	35
2.8.1.	Técnicas de reciclagem a quente	35
2.8.2.	Técnicas de reciclagem a frio.....	37
2.8.3.	Reciclagem semi-quente em central.....	40

Capítulo 3

SUSTENTABILIDADE DOS PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS

3.	SUSTENTABILIDADE DOS PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS.....	41
3.1.	Conceito de sustentabilidade	41
3.2.	Conceito de Ciclo de Vida	43
3.2.1.	Enquadramento.....	43
3.2.2.	Ciclo de vida dos pavimentos rodoviários	44
3.2.3.	Normalização das Avaliações do Ciclo de Vida	46
3.3.	Processo de Avaliação do Ciclo de Vida	47

3.3.1. Objetivo e âmbito do estudo.....	48
3.3.2. Inventário do Ciclo de Vida.....	48
3.3.3. Avaliação de impactes	49
3.3.4. Interpretação.....	51
3.3.5. Variantes das Avaliações do Ciclo de Vida	51
3.4. Fatores que influenciam a sustentabilidade dos pavimentos rodoviários	53
3.4.1. Carbonatação do betão.....	53
3.4.2. Energia consumida para iluminação da estrada	55
3.4.3. Albedo.....	56
3.4.4. Resistência ao rolamento.....	57
3.4.5. Produção de lixiviados	67
3.5. Metodologias de Avaliação do Ciclo de Vida de pavimentos rodoviários.....	67

Capítulo 4

DESENVOLVIMENTO DE UMA METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DOS PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS

4. DESENVOLVIMENTO DE UMA METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DOS PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS	71
4.1. Enquadramento da Metodologia	71
4.2. Objetivo e âmbito de estudo	72
4.2.1. Descrição do sistema e suas limitações	73
4.2.2. Unidade funcional.....	75
4.3. Organização da metodologia.....	76
4.4. Valores unitários (consumos e emissões).....	81
4.5. Estratégias de conservação e reabilitação	82
4.6. Apresentação dos resultados da metodologia desenvolvida	85

Capítulo 5

DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO PARA AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO ROLAMENTO

5. DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO PARA AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO ROLAMENTO	87
5.1. Objetivo	87
5.2. Breve descrição do equipamento	87
5.3. Características técnicas e geométricas	89
5.4. Transmissão de dados	91
5.5. Calibração do equipamento	91
5.5.1. Comparação do esforço de torque com o consumo de energia	92
5.5.2. Inclinação das rodas	95
5.5.3. Tempo de rolamento	96
5.6. Procedimentos de ensaio a adotar	99
5.7. Desenvolvimentos futuros	100

Capítulo 6

CARACTERIZAÇÃO DAS SUPERFÍCIES DOS TRECHOS E DAS MISTURAS A UTILIZAR NO ESTUDO DOS PAVIMENTOS

6. CARACTERIZAÇÃO DAS SUPERFÍCIES DOS TRECHOS E DAS MISTURAS A UTILIZAR NO ESTUDO DOS PAVIMENTOS	101
6.1. Introdução	101
6.2. Ensaio para caracterização das diferentes misturas e superfícies de pavimentos estudadas nos trechos	102
6.2.1. Percentagem de ligante das misturas betuminosas	104
6.2.2. Análise granulométrica dos agregados das misturas betuminosas	104
6.2.3. Determinação da Profundidade Média da Textura (MTD)	105
6.2.4. Determinação da Profundidade Estimada da Textura (ETD)	106

6.2.5.	Determinação do Coeficiente de Atrito Pontual (PTV)	108
6.3.	Resultados dos ensaios de caracterização das diferentes misturas e superfícies de pavimentos estudadas nos trechos	109
6.3.1.	Caracterização da Superfície A.....	110
6.3.2.	Caracterização da Superfície B	114
6.3.3.	Caracterização da Superfície C	119
6.3.4.	Caracterização da Superfície D	124
6.4.	Caracterização do módulo de rigidez das misturas a utilizar para análise da sustentabilidade de diferentes estruturas de pavimentos	127
6.4.1.	Ensaio de módulo de rigidez por flexão em quatro pontos	127
6.4.2.	Módulo de rigidez da mistura utilizada na camada de base (AC 20 base 35/50) ou ligação (AC 20 bin 35/50)	130
6.4.3.	Resultados do módulo de rigidez do betão betuminoso (AC 14 surf 35/50) utilizado na camada de desgaste	131
6.4.4.	Resultados do módulo de rigidez da mistura drenante (PA 12,5 PMB 25/55) utilizada na camada de desgaste	133
6.4.5.	Resultados do módulo de rigidez da mistura rugosa (AC 14 surf PMB 25/55) utilizada na camada de desgaste	134
6.4.6.	Comparação dos resultados do módulo de rigidez das várias misturas	135

Capítulo 7

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DA RESISTÊNCIA AO ROLAMENTO

7.	AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DA RESISTÊNCIA AO ROLAMENTO	137
7.1.	Apresentação dos ensaios	137
7.2.	Esforço de torque e consumo de energia das superfícies em estudo.....	138
7.2.1.	Superfície A.....	139
7.2.2.	Superfície B.....	140
7.2.3.	Superfície C.....	141
7.2.4.	Superfície D.....	142

7.3.	Análise dos resultados com recurso a técnicas de <i>Data Mining</i>	144
7.3.1.	Previsão do consumo de energia e esforço de torque com recurso a Redes Neuronais Artificiais.....	146
7.3.2.	Previsão do consumo de energia e do esforço de torque com recurso a Máquinas de Vetores de Suporte.....	154
7.3.3.	Conclusões da aplicação das técnicas de <i>Data Mining</i> aos resultados obtidos experimentalmente.....	158
7.4.	Extrapolação para valores reais através dos modelos de <i>Data Mining</i> desenvolvidos	159

Capítulo 8

ANÁLISE DA SUSTENTABILIDADE DE DIFERENTES ESTRUTURAS DE PAVIMENTOS

8.	ANÁLISE DA SUSTENTABILIDADE DE DIFERENTES ESTRUTURAS DE PAVIMENTOS.....	161
8.1.	Considerações iniciais	161
8.2.	Estruturas de pavimentos analisadas.....	161
8.3.	Estratégias de conservação adotadas.....	164
8.4.	Modelos de degradação dos pavimentos.....	170
8.5.	Impactes imputáveis a cada estrutura de pavimento.....	172
8.5.1.	Impactes da construção inicial.....	172
8.5.2.	Impactes das operações de conservação	174
8.5.3.	Análise comparativa dos impactes das operações de construção e conservação	179
8.5.4.	Impactes da utilização da estrada pelos utentes.....	182
8.5.5.	Análise global dos impactes no período de análise da estrada	185
8.5.6.	Influência do nível de tráfego nos resultados obtidos	187
8.6.	Análise de custos	190
8.6.1.	Custos imputáveis às administrações rodoviárias	190
8.6.2.	Custos imputáveis aos utentes.....	193
8.6.3.	Custos globais.....	195

8.7. Conclusões da análise da sustentabilidade das diferentes alternativas durante o período de análise	196
---	-----

Capítulo 9

CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

9. CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	199
9.1. Conclusões	199
9.2. Propostas para desenvolvimentos futuros	203

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Diferença na visibilidade com chuva entre um pavimento com camada de desgaste convencional, na faixa da direita, e com camada de desgaste drenante, na faixa da esquerda (GRAMME, 2009)	20
Figura 2 – Central móvel para reciclagem de pavimentos flexíveis a quente <i>in situ</i> (Wirtgen, 2016b)	36
Figura 3 – Central móvel para a produção de misturas recicladas a frio (Wirtgen, 2016a)	37
Figura 4 – Equipamento utilizado para reciclagem a frio <i>in situ</i> com ligantes betuminosos (Wirtgen, 2012)	39
Figura 5 – Representação gráfica dos três pilares da sustentabilidade (adaptado de Wathne (2010))	42
Figura 6 – Fases do ciclo de vida dos pavimentos e interação com o ambiente (adaptado de Park <i>et al.</i> , 2003)	45
Figura 7 – Fases e aplicações de uma Avaliação do Ciclo de Vida (adaptado de ISO 14040 (2006))	47
Figura 8 – Elementos que compõe a fase de Avaliação de Impactes de Ciclo de Vida (adaptado de ISO 14040 (2006))	50
Figura 9 – Representação esquemática das fases de ciclo de vida incluídas em cada uma das três variantes de análise LCA (adaptado de Bragança e Mateus (2011))	52
Figura 10 – Medição da frente de carbonatação com solução de fenolftaleína (adaptado de Simas (2007))	55
Figura 11 – Balanço de energia na superfície do pavimento (adaptado de Kaloush <i>et al.</i> (2008))	56
Figura 12 – Representação esquemática de uma ilha de calor (adaptado de Munson's City (2012)) ..	57
Figura 13 – Deformação de um pneu sob a ação da carga imposta pelo veículo (adaptado de Michelin (2003))	58
Figura 14 – Forças verticais na superfície de contacto entre o pneu e o pavimento (traduzido de Michelin (2003))	59

Figura 15 – Intervalos em termos de comprimentos de onda e frequência espacial da textura e previsão dos seus efeitos mais significativos (adaptado de Sandberg e Ejsmont (2002)).....	60
Figura 16 – Exemplo ilustrativo da percentagem de energia total consumida devido à resistência ao rolamento (adaptado de Nokian Tyres plc (2004))	61
Figura 17 – Tambores de ensaio da interação pneu-pavimento para medições da resistência ao rolamento em laboratório.....	62
Figura 18 – Atrilhos para medição da resistência ao rolamento em estradas (Bergiers <i>et al.</i> , 2011).....	63
Figura 19 – Superfície de um dos pavimentos analisados antes e depois da reabilitação superficial (Amos, 2006).....	66
Figura 20 – Fluxos de energia/materiais e interações entre as fases do Ciclo de Vida dos pavimentos.....	75
Figura 21 – Excerto da primeira folha de cálculo da metodologia.....	79
Figura 22 – Excerto da caracterização dos processos, com indicação dos consumos e emissões unitários	82
Figura 23 – Excerto da secção relativa às atividades de conservação, manutenção e/ou reforço.....	83
Figura 24 – Protótipo construído para avaliação da resistência ao rolamento.....	88
Figura 25 – Constituição do protótipo para avaliação da resistência ao rolamento	89
Figura 26 – Anéis deslizantes para transmissão de dados e energia ao motor	91
Figura 27 – Painel frontal da aplicação desenvolvida para monitorização do esforço de torque e controlo do funcionamento do equipamento.....	92
Figura 28 – Multímetro utilizado para medição do consumo de energia.....	93
Figura 29 – Esquema do emparelhamento dos equipamentos utilizados para medição do consumo de energia	93
Figura 30 – Painel frontal da aplicação desenvolvida para monitorização do consumo de energia.....	94
Figura 31 – Comparação do esforço de torque e do consumo de energia registados para o mesmo ensaio.....	95
Figura 32 – Esforço de torque obtido para as diferentes inclinações das rodas face à trajetória normal	96
Figura 33 – Resistência ao rolamento medida nas condições definidas pela norma ISO 18164 (adaptado de Michelin (2003)).....	97

Figura 34 – Evolução do esforço de torque ao longo do tempo em ensaios com carga de 700N a atuar sobre cada roda.....	98
Figura 35 – Evolução do esforço de torque ao longo do tempo em ensaios com carga de 1000N a atuar sobre cada roda.....	98
Figura 36 – Espalhamento e compactação de uma mistura betuminosa aplicada num dos trechos .	103
Figura 37 – Aspeto final de um dos trechos construídos.....	103
Figura 38 – Determinação das percentagens de ligante das misturas betuminosas aplicadas nos trechos.....	104
Figura 39 – Peneiração mecânica dos agregados resultantes do processo de determinação da percentagem de ligante por ignição.....	104
Figura 40 – Ilustração do princípio do método da mancha de areia (adaptado de Branco <i>et al.</i> (2005)).....	105
Figura 41 – Realização do ensaio da mancha de areia num dos trechos em estudo.....	106
Figura 42 – Laser utilizado para medição e registo do perfil das superfícies do pavimento em estudo.....	107
Figura 43 – Ilustração dos termos usados na determinação do MPD (NP EN ISO 13473-1 (2011))..	107
Figura 44 – Zonas de contacto entre o pneu e o pavimento.....	108
Figura 45 – Realização do ensaio com o Pêndulo Britânico num dos trechos em estudo.....	109
Figura 46 – Trecho construído com mistura AC 14 surf (superfície A).....	110
Figura 47 – Agregados resultantes da separação do material incinerado para determinação da percentagem de ligante da mistura aplicada no trecho correspondente à superfície A ...	111
Figura 48 – Curva granulométrica dos agregados utilizados mistura aplicada no trecho correspondente à superfície A.....	111
Figura 49 – Perfil longitudinal do trecho construído com mistura que deu origem à superfície A	113
Figura 50 – Trecho resultante da sobreposição à superfície anterior (AC 14 surf) de <i>slurry seal</i> (superfície B).....	114
Figura 51 – Agregados utilizados na produção do <i>slurry seal</i> aplicado no trecho correspondente à superfície B.....	115
Figura 52 – Curva granulométrica dos agregados utilizados no <i>slurry seal</i> aplicado no trecho correspondente à superfície B.....	116
Figura 53 – Perfil longitudinal do trecho construído com <i>slurry seal</i> (sobre a superfície A) que deu origem à superfície B.....	118

Figura 54 – Trecho construído com mistura PA 12,5 (superfície C)	119
Figura 55 – Agregados resultantes da separação do material incinerado para determinação da percentagem de ligante da mistura aplicada no trecho correspondente à superfície C ...	120
Figura 56 – Curva granulométrica dos agregados utilizados na mistura aplicada no trecho correspondente à superfície C.....	121
Figura 57 – Perfil longitudinal da pista construída com mistura C.....	123
Figura 58 – Trecho resultante da sobreposição à superfície anterior (PA 12,5) de uma calda de cimento (superfície D).....	124
Figura 59 – Perfil longitudinal do trecho construído com calda de cimento (sobre a superfície C) e que deu origem à superfície D.....	126
Figura 60 – Equipamento utilizado no ensaio do módulo de rigidez	128
Figura 61 – Produção das misturas betuminosas.....	129
Figura 62 – Processo de espalhamento e compactação das misturas betuminosas	129
Figura 63 – Módulo de rigidez da mistura utilizada na camada de base (AC 20 base 35/50) ou ligação (AC 20 bin 35/50) à temperatura de 20 °C.....	130
Figura 64 – Ângulo de fase da mistura utilizada na camada de base (AC 20 base 35/50) ou ligação (AC 20 bin 35/50) à temperatura de 20 °C.....	131
Figura 65 – Módulo de rigidez do betão betuminoso (AC 14 surf 35/50) utilizado na camada de desgaste à temperatura de 20 °C.....	132
Figura 66 – Ângulo de fase do betão betuminoso (AC 14 surf 35/50) utilizado na camada de desgaste à temperatura de 20 °C.....	132
Figura 67 – Módulo de rigidez da mistura drenante (PA 12,5 PMB 25/55) utilizada na camada de desgaste à temperatura de 20 °C.....	133
Figura 68 – Ângulo de fase da mistura drenante (PA 12,5 PMB 25/55) utilizada na camada de desgaste à temperatura de 20 °C.....	133
Figura 69 – Módulo de rigidez da mistura rugosa (AC 14 surf PMB 25/55) utilizada na camada de desgaste à temperatura de 20 °C.....	134
Figura 70 – Ângulo de fase da mistura rugosa (AC 14 surf PMB 25/55) utilizada na camada de desgaste à temperatura de 20 °C.....	135
Figura 71 – Módulos de rigidez obtidos para as diferentes misturas estudadas à temperatura de 20 °C	136
Figura 72 – Ângulo de fase obtidos para as diferentes misturas estudadas à temperatura de 20 °C.	136

Figura 73 – Média dos valores obtidos para o esforço de torque na superfície A	139
Figura 74 – Média dos valores obtidos para o consumo de energia na superfície A.....	140
Figura 75 – Média dos valores obtidos para o esforço de torque na superfície B	141
Figura 76 – Média dos valores obtidos para o consumo de energia na superfície B.....	141
Figura 77 – Média dos valores obtidos para o esforço de torque na superfície C	142
Figura 78 – Média dos valores obtidos para o consumo de energia na superfície C.....	142
Figura 79 – Média dos valores obtidos para o esforço de torque na superfície D.....	143
Figura 80 – Média dos valores obtidos para o consumo de energia na superfície D.....	143
Figura 81 – Exemplo da arquitetura do perceptrão multicamadas (adaptado de Cortez (2010))	147
Figura 82 – Resultados da utilização do modelo RNA_M5E	148
Figura 83 – Importância atribuída pelo modelo RNA_M5E a cada parâmetro de entrada, na previsão do consumo de energia	148
Figura 84 – Resultados da utilização do modelo RNA_M3E	149
Figura 85 – Resultados da utilização do modelo RNA_M1E	150
Figura 86 – Resultados da utilização do modelo RNA_M5T	152
Figura 87 – Importância atribuída pelo modelo RNA_M5T a cada parâmetro de entrada, na previsão do esforço de torque	152
Figura 88 – Resultados da utilização do modelo RNA_M3T	153
Figura 89 – Exemplo de uma transformação MVS (adaptado de Cortez (2010)).....	155
Figura 90 – Resultados da utilização do modelo MVS_M3_1 na previsão do consumo de energia....	157
Figura 91 – Resultados da utilização do modelo MVS_M4_3 na previsão do esforço de torque	158
Figura 92 – Representação esquemática das estruturas dos pavimentos consideradas.....	162
Figura 93 – Evolução típica da qualidade estrutural de um pavimento (adaptado de Bernucci <i>et</i> <i>a/.</i> (2008), DCS (2008) e Mueller (2012))	165
Figura 94 – Evolução prevista para a qualidade estrutural do pavimento considerando o cenário 1..	166
Figura 95 – Evolução prevista para a qualidade estrutural do pavimento considerando o cenário 2..	167
Figura 96 – Evolução prevista para a qualidade estrutural do pavimento considerando o cenário 3..	168
Figura 97 – Evolução prevista para a qualidade estrutural do pavimento considerando o cenário 4..	169
Figura 98 – Previsão da irregularidade no final do ano t, IRI _t (m/km), para um pavimento com fundação F3 e classe de tráfego T1 (adaptado de Rodrigues (2013))	171
Figura 99 – Evolução do IRI (m/km) esperada para cada cenário em estudo.....	172
Figura 100 – Recursos utilizados na construção dos pavimentos.....	173

Figura 101 – Consumo de energia e emissões resultantes da construção inicial.....	174
Figura 102 – Agregados virgens necessários para as operações de conservação.....	175
Figura 103 – Betume novo necessário para as operações de conservação.....	175
Figura 104 – Material fresado (RAP) reutilizado nas operações de conservação.....	176
Figura 105 – Consumo de energia resultante das operações de conservação.....	177
Figura 106 – Emissões de CO _{2-eq} resultantes das operações de conservação.....	177
Figura 107 – Emissões de SO ₂ resultantes das operações de conservação.....	178
Figura 108 – Emissões de NO _x resultantes das operações de conservação.....	178
Figura 109 – Agregados virgens necessários para as operações de construção e conservação.....	179
Figura 110 – Betume novo necessário para as operações de construção e conservação.....	180
Figura 111 – Consumo de energia resultante das operações de construção e conservação.....	180
Figura 112 – Emissões de CO _{2-eq} resultantes das operações de construção e conservação.....	181
Figura 113 – Emissões de SO ₂ resultantes das operações de construção e conservação.....	181
Figura 114 – Emissões de NO _x resultantes das operações de construção e conservação.....	181
Figura 115 – Consumo de energia resultante da utilização da estrada.....	183
Figura 116 – Emissões de CO _{2-eq} resultantes da utilização da estrada.....	184
Figura 117 – Emissões de SO ₂ resultantes da utilização da estrada.....	184
Figura 118 – Emissões de NO _x resultantes da utilização da estrada.....	184
Figura 119 – Consumo global de energia no período de análise do ciclo de vida da estrada.....	185
Figura 120 – Emissões globais de CO _{2-eq} no período de análise do ciclo de vida da estrada.....	185
Figura 121 – Emissões globais de SO ₂ no período de análise do ciclo de vida da estrada.....	186
Figura 122 – Emissões globais de NO _x no período de análise do ciclo de vida da estrada.....	186
Figura 123 – Previsão da irregularidade no final do ano t, IRI _t (m/km), para um pavimento com fundação F3 e classe de tráfego T5 (adaptado de Rodrigues (2013)).....	189
Figura 124 – Custos estimados para as operações de construção inicial da estrada.....	191
Figura 125 – Custos estimados para as operações de conservação no período em análise.....	192
Figura 126 – Custos totais estimados para as operações de construção e conservação.....	192
Figura 127 – Custos totais estimados do consumo de combustível no período em análise.....	194
Figura 128 – Custos globais imputáveis às diferentes estruturas e cenários em estudo.....	195

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 – Fatores que afetam a resistência ao rolamento (Woodside <i>et al.</i> , 2003)	60
Quadro 2 – Efeito sobre o total de energia consumida em função de diferentes mudanças na resistência ao rolamento (Bendtsen, 2004)	64
Quadro 3 – Resumo dos resultados obtidos em estudos sobre o efeito da rugosidade no consumo de combustível a velocidade constante (McClean e Foley, 1998).....	65
Quadro 4 – Componentes do ciclo de vida dos pavimentos rodoviários consideradas pelas diferentes metodologias (adaptado de Santero <i>et al.</i> (2011b)).....	68
Quadro 5 – Componentes relacionadas com a utilização dos pavimentos rodoviários consideradas por algumas das metodologias recentemente desenvolvidas (adaptado de AzariJafari <i>et al.</i> (2016)).....	69
Quadro 6 – Misturas consideradas para a construção inicial do pavimento	80
Quadro 7 – Misturas consideradas para as atividades de conservação, manutenção e/ou reforço.....	84
Quadro 8 – Profundidade Média da Textura (MTD) da superfície A (mm)	112
Quadro 9 – Média dos valores da Profundidade Média do Perfil (MPD) da superfície A (mm)	112
Quadro 10 – Valores de PTV obtidos na superfície A	114
Quadro 11 – Profundidade Média da Textura (MTD) da superfície B (mm)	116
Quadro 12 – Média dos valores da Profundidade Média do Perfil (MPD) da superfície B (mm)	117
Quadro 13 – Valores de PTV obtidos na superfície B	118
Quadro 14 – Profundidade Média da Textura (MTD) da superfície C (mm).....	121
Quadro 15 – Média dos valores da Profundidade Média do Perfil (MPD) da superfície C (mm)	122
Quadro 16 – Valores de PTV obtidos na superfície C	123
Quadro 17 – Profundidade Média da Textura (MTD) da superfície D (mm).....	125
Quadro 18 – Média dos valores da Profundidade Média do Perfil (MPD) da superfície D (mm)	125
Quadro 19 – Valores de PTV obtidos na superfície D	127
Quadro 20 – Distâncias percorridas durante a realização dos ensaios	138
Quadro 21 – Matriz de correlação das variáveis independentes (R).....	144

Quadro 22 – Métricas obtidas na avaliação do desempenho dos modelos de RNA na previsão do consumo de energia, durante o processo de treino.....	150
Quadro 23 – Métricas obtidas na avaliação do desempenho dos modelos de RNA na previsão do esforço de torque, durante o processo de treino	154
Quadro 24 – Parâmetros de entrada considerados em cada um dos modelos MVS	156
Quadro 25 – Métricas obtidas na avaliação do desempenho dos modelos MVS na previsão do consumo de energia, durante o processo de treino.....	156
Quadro 26 – Métricas obtidas na avaliação do desempenho dos modelos MVS na previsão do esforço de torque, durante o processo de treino	157
Quadro 27 – <i>Inputs</i> relativos às características dos pavimentos considerados nas extrapolações de consumos de energia em condições de circulação real	159
Quadro 28 – Extrapolação do consumo de energia em condições de circulação real.....	160
Quadro 29 – Tráfego médio diário por sentido de circulação	163
Quadro 30 – Espessura (mm) das várias camadas das diferentes estruturas de pavimento considerando um período de vida de 20 anos	164
Quadro 31 – Espessura (mm) das várias camadas das diferentes estruturas de pavimento considerando um período de vida de 50 anos	169
Quadro 32 – Influência das atividades de construção e conservação nos impactes do ciclo de vida da estrada	187
Quadro 33 – Impactes das diversas fases do ciclo de vida do pavimento (classe de tráfego T5)	189
Quadro 34 – Influência das diversas fases do ciclo de vida do pavimento (classe de tráfego T5)	189
Quadro 35 – Principais custos unitários considerados.....	191
Quadro 36 – Estimativa dos custos associados ao consumo de combustível durante o período em análise.....	194

SIMBOLOGIA

Siglas/Abreviaturas

a.C.	– antes de Cristo
AB	– Argamassa Betuminosa
ABGE	– Agregados Britados de Granulometria Extensa
AC	– <i>Asphalt Concrete</i>
AFNOR	– <i>Association Française de Normalisation</i>
AGEC	– Agregado de Granulometria Extensa tratado com Cimento
ASTM	– <i>American Society for Testing and Materials</i>
base	– abreviatura de “ <i>base course</i> ”
BAST	– <i>Die Bundesanstalt für Straßenwesen</i> (Instituto Federal de Investigação Rodoviária)
BB	– Betão Betuminoso
BB	– Betumes Borracha
BBA	– Betume Borracha de Alta percentagem de granulado de borracha
BBB	– Betume Borracha de Baixa percentagem de granulado de borracha
BBd	– Betão Betuminoso drenante
BBM	– Betume Borracha de Média percentagem de granulado de borracha
BBr	– Betão Betuminoso rugoso
bin	– abreviatura de “ <i>binder course</i> ”
BRRC	– <i>Belgian Road Research Centre</i>
CEM	– Cimento
DTA	– Análise térmica diferencial
EBA	– etileno-butilo-acrilato
EMA	– etileno-metilo-acrilato

EN	– <i>European Standards</i>
EPA	– <i>Environmental Protection Agency</i>
EPD	– <i>Environmental Product Declaration</i>
ETD	– <i>Estimated Texture Depth</i>
EVA	– etileno-vinil-acetato
F3	– Classe de fundação 3, definida pelo MACOPAV (JAE, 1995)
FTIR	– Espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier
GWP	– <i>Global Warming Potential</i>
HDM	– <i>Highway Design and Maintenance Standards Model</i>
IC	– Itinerário Complementar
IP	– Itinerário Principal
IRI	– <i>International Roughness Index</i>
IRI ₀	– IRI inicial, isto é, no ano 0 (ou de abertura ao tráfego)
IRI _t	– IRI registado no ano t (t anos após a abertura ao tráfego)
ISO	– <i>International Organization for Standardization</i>
ISOHDM	– <i>International Study of Highway Development and Management Tools</i>
LCA	– <i>Life Cycle Assessment</i>
LCCA	– <i>Life Cycle Costs Analysis</i>
LCI	– <i>Life Cycle Inventory</i>
LED	– <i>Light-Emitting Diodes</i>
LNEC	– Laboratório Nacional de Engenharia Civil
MACOPAV	– Manual de Concepção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional
MAD	– <i>Mean Absolute Deviation</i>
MB	– Macadame Betuminoso
MBA-BBA	– Mistura Betuminosa Aberta com Borracha
MBAM	– Mistura Betuminosa de Alto Módulo
mBBr	– micro Betão Betuminoso rugoso
MBD	– Mistura Betuminosa Densa
MBR-BBA	– Mistura Betuminosa Rugosa com Borracha
MIRIAM	– <i>Models for rolling resistance In Road Infrastructure Asset Management systems</i>

MPD	– <i>Mean Profile Depth</i>
MRI	– <i>Midwest Research Institute</i>
MTD	– <i>Mean Texture Depth</i>
MVS	– Máquinas de Vetores de Suporte
MVS_M3	– Modelo de MVS que considera 3 parâmetros de entrada
MVS_M4	– Modelo de MVS que considera 4 parâmetros de entrada
MVS_M5	– Modelo de MVS que considera 5 parâmetros de entrada
NP	– Norma Portuguesa
pH	– potencial de Hidrogénio
PA	– <i>Porous Asphalt</i>
PCA	– <i>Portland Cement Association</i>
PCG	– Prensa de Corte Giratória
PIB	– polisobutileno
PMB	– <i>Polymer Modified Bitumen</i>
PTV	– <i>Pendulum Test Value</i>
R	– Ambiente informático utilizado para a manipulação de dados
RAP	– <i>Reclaimed Asphalt Pavement</i>
reg	– Abreviatura de “ <i>regulating course</i> ”
RMiner	– Biblioteca (ou pacote de <i>software</i>) para manipulação de dados em ambiente <i>R</i>
RMSE	– <i>Root Mean Square Error</i>
RNA	– Redes Neurais Artificiais
RNA_M1E	– Modelo de RNA que considera 1 parâmetro de entrada para prever a energia
RNA_M3E	– Modelo de RNA que considera 3 parâmetros de entrada para prever a energia
RNA_M5E	– Modelo de RNA que considera 5 parâmetros de entrada para prever a energia
RNA_M3T	– Modelo de RNA que considera 3 parâmetros de entrada para prever o torque
RNA_M5T	– Modelo de RNA que considera 5 parâmetros de entrada para prever o torque
SAMI	– <i>Stress Absorbing Membrane Interlayer</i>
SB	– estireno-butadieno
SBR	– co-polímero de estireno-butadieno e borracha
SBS	– estireno-butadieno-estireno

SIS	– estireno-isopreno-estireno
surf	– Abreviatura de “ <i>surface course</i> ”
SUV	– <i>Sport Utility Vehicle</i>
T1	– Classe de tráfego 1, definida pelo MACOPAV (JAE, 1995)
T5	– Classe de tráfego 5, definida pelo MACOPAV (JAE, 1995)
TGA	– Análise termogravimétrica (<i>Thermogravimetric analysis</i>)
TR	– <i>Technical Report</i>
TS	– <i>Technical Specification</i>
TUG	– <i>Technical University of Gdansk</i>
XRDA	– Análise de difração de Raio-X (<i>X-Ray Diffraction Analysis</i>)
WCED	– <i>World Commission on Environment and Development</i>

Símbolos Químicos

CaO	– Óxido de Cálcio
Ca(OH) ₂	– Hidróxido de Cálcio
CH ₄	– Metano
CO ₂	– Dióxido de Carbono
MgO	– Óxido de Magnésio
Mg(OH) ₂	– Hidróxido de Magnésio
N ₂ O	– Óxido Nitroso
NO _x	– Óxidos de Azoto
SO ₂	– Dióxido de Enxofre

Notações Escalares Maiúsculas Latinas

CBR	– <i>California Bearing Ratio</i> (%)
CTCV _(y0-yn)	– consumo total de combustível pelos veículos entre os anos 0 e n (l)

CTE	– consumo total de energia (J)
CUC _i	– consumo unitário de combustível do equipamento i (l/m ³)
CUCV _{x_i}	– consumo unitário de combustível dos veículos do tipo x _i (l/km)
D	– dano ou percentagem da resistência do pavimento já gasta (%)
E _f	– módulo de deformabilidade da fundação (MPa)
E _m	– módulo de deformabilidade das misturas betuminosas (MPa ou Pa)
E _{sb}	– módulo de deformabilidade da sub-base (MPa)
ETL _(g)	– emissões totais do gás g libertadas (kg)
ETV _{(g)(y0-yn)}	– emissões totais do gás g libertadas pelos veículos entre os anos 0 e n (kg)
EUL _(g)	– emissões unitárias do gás g libertadas pelo equipamento i (kg/l)
EULV _{x_i(g)}	– emissões unitárias do gás g libertado pelos veículos de tipo x _i (kg/l)
FUCE _i	– fator unitário de conversão em energia do combustível utilizado pelo equipamento i (J/l)
I	– número de parâmetros de entrada (<i>inputs</i>)
k	– constante a adotar para a determinação do módulo de deformabilidade da sub-base granular
K _s	– parâmetro que depende da probabilidade de sobrevivência atribuída no âmbito do dimensionamento do pavimento
M _a	– massa de agregado na mistura (g)
M _{aF}	– massa de agregado do material fresado na mistura reciclada (g)
M _{aN}	– massa de agregado novo na mistura reciclada (g)
M _{aR}	– massa de agregado total na mistura reciclada (g)
M _b	– massa de betume na mistura (g)
M _{bF}	– massa de betume do material fresado na mistura reciclada (g)
M _{bN}	– massa de betume novo na mistura reciclada (g)
M _{bR}	– massa de betume total na mistura reciclada (g)
M _t	– massa total da mistura (g)
M _{tF}	– massa total de material fresado na mistura reciclada (g)
M _{tR}	– massa total de mistura reciclada (g)
N	– número de amostras
N ₈₀	– número de eixos padrão de 80 kN admissíveis

N_{130}	– número de eixos-padrão de 130 kN admissíveis
N_p	– número de eixos-padrão que vão solicitar o pavimento
R	– coeficiente de correlação de <i>Pearson</i>
R^2	– coeficiente de determinação
R_f	– valor da tensão característica de resistência à tração sob flexão do material aos 28 dias (MPa)
S_{bt}	– grau de saturação em betume (%)
S_b	– rigidez do betume (MPa)
$TMDA_{x_i(y_0)}$	– tráfego médio diário anual de veículos do tipo x_i no ano 0 (em que x_i corresponde a veículos ligeiros, pesados de mercadorias e pesados de passageiros)
V_a	– volume de agregado na mistura (cm^3) ou percentagem volumétrica de agregado (%)
V_{aR}	– volume de agregado da mistura reciclada (cm^3)
V_b	– volume de betume na mistura (cm^3) ou percentagem volumétrica de betume (%)
V_{bR}	– volume de betume da mistura reciclada (cm^3)
V_j	– volume de material/mistura j utilizado (m^3)
V_t	– volume total da mistura (cm^3)
V_{tR}	– volume total da mistura reciclada (cm^3)
V_v	– volume de vazios na mistura (cm^3) ou percentagem volumétrica de vazios (%)
V_{vR}	– volume de vazios da mistura reciclada (cm^3)
VMA	– volume de vazios no esqueleto de agregado (%)
VMA_R	– volume de vazios no esqueleto de agregado da mistura reciclada (cm^3 ou %)
$W_{i,j}$	– peso da ligação entre os nodos i e j

Notações Escalares Minúsculas Latinas

ct	– taxa de crescimento do tráfego (%)
d	– distância média percorrida (km)
h_g	– espessura da camada granular sobre o solo de fundação (mm)
n	– porosidade (%)

n_y	– número de anos
o	– parâmetro de saída (<i>output</i>)
p_b	– percentagem de betume (%)
t_b	– teor em betume (%)
x_i	– parâmetros de entrada ou nodos
y_i	– valor medido
\hat{y}_i	– valor previsto

Notações Escalares Gregas

ε_{dp}	– extensão vertical de compressão no topo da fundação
ε_t	– extensão radial de tração na base das camadas betuminosas
$\rho_{m\acute{a}x}$	– massa volúmica “máxima” da mistura betuminosa (g/cm^3)
ρ_s	– massa volúmica das partículas secas dos agregados (g/cm^3)
ρ_t	– massa volúmica da mistura betuminosa (g/cm^3)
σ_t	– valor máximo da tensão de tração (MPa)

Símbolos

\in	– pertencente
\mathfrak{R}'	– conjunto de números reais

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento

Os pavimentos rodoviários afiguram-se, no presente, como infraestruturas de grande importância para o desenvolvimento socioeconómico das regiões. Atualmente valoriza-se bastante a sua construção pelo menor custo, apesar de começar a existir uma visão mais ampla sobre esta matéria, incluindo a perspetiva ambiental e procurando determinar todos os impactes (económicos, sociais e ambientais) que os pavimentos rodoviários apresentam a longo prazo.

A noção de sustentabilidade passou a fazer parte do dia-a-dia das pessoas, sendo importante a sua adequada avaliação nos projetos de Engenharia. Os pavimentos rodoviários não são exceção, até porque são infraestruturas às quais surge associada uma carga ambiental considerável.

O conceito de desenvolvimento sustentável foi definido em 1987 pela Comissão Mundial para o Ambiente e o Desenvolvimento (*World Commission on Environment and Development – WCED*) como “o desenvolvimento que satisfaz as necessidades do presente, sem comprometer a capacidade das gerações futuras satisfazerem as suas próprias necessidades” (WCED, 1987). Na sua essência, esta forma de desenvolvimento implica um equilíbrio entre o desenvolvimento económico e social e a proteção ambiental, ou seja, entre as atividades humanas e o mundo natural em que se inserem.

Assim, à medida que aumenta a perceção de que os recursos naturais (minerais, combustíveis fósseis, entre muitos outros) não são inesgotáveis, intensifica-se a pesquisa de soluções que permitam reduzir

a sua dependência. Por outro lado, também é uma preocupação cada vez maior para a Sociedade e para os governantes a redução de emissões gasosas com efeitos de estufa, havendo metas cada vez mais rigorosas a serem cumpridas relativamente a este aspeto. Exemplo disso são os objetivos traçados pela União Europeia e que preveem, até 2020, a redução de 20% dos gases com efeito de estufa (em relação aos níveis de 1990), a utilização de 20% de energia proveniente de fontes renováveis e uma melhoria de 20% na eficiência energética (Capros *et al.*, 2008).

No sentido de encontrar soluções de pavimentação mais sustentáveis têm sido apresentadas algumas metodologias de Análise do Ciclo de Vida (*Life Cycle Assessment – LCA*) dos pavimentos rodoviários. Contudo, e de acordo com a pesquisa bibliográfica efetuada, as metodologias LCA propostas focam-se, na sua maioria, nas fases de extração de matérias-primas, produção, transporte e aplicação dos materiais rodoviários no pavimento.

Fica assim evidente a necessidade de complementar a análise realizada pelas metodologias até agora propostas, considerando outras fases do ciclo de vida, nomeadamente a fase de utilização da estrada. Embora a quantificação dos impactes durante a fase de utilização da estrada não seja tarefa fácil, acredita-se que a sua consideração pode ter um grande potencial para influenciar a análise do ciclo de vida de diferentes soluções de pavimentação.

De facto, na análise do ciclo de vida existem diversos fatores que poderiam ser considerados na fase de utilização de uma estrada, nomeadamente, a carbonatação do betão em pavimentos rígidos, a energia consumida para iluminação, o albedo, a resistência ao rolamento ou a produção de lixiviados, entre outros. Sendo a resistência ao rolamento um dos principais fatores, devido ao seu potencial para influenciar o consumo de combustível dos veículos que circulam sobre os pavimentos, com o presente trabalho pretende-se contribuir para o seu estudo, potenciando assim a sua inclusão numa nova metodologia de análise do ciclo de vida de pavimentos rodoviários.

1.2. Objetivos e metodologia

A presente Tese tem como objetivo principal a contribuição para a definição e estudo da sustentabilidade de diferentes estruturas e materiais de pavimentos rodoviários. Desta forma, procura

contribuir para a compreensão da sustentabilidade de várias soluções, de forma a utilizar-se os recursos disponíveis de forma racional e equilibrada e reduzindo as emissões de gases resultantes da sua produção e utilização.

Para tal, ao longo deste trabalho, procuraram-se alcançar os seguintes objetivos específicos:

- Investigar as metodologias existentes para Análise do Ciclo de Vida dos pavimentos rodoviários;
- Propor uma nova metodologia de Análise do Ciclo de Vida para os pavimentos rodoviários, que atenda a aspetos relacionados com a sua utilização, e não se limite à fase de construção;
- Desenvolver um ensaio/protótipo para avaliação da resistência ao rolamento de diferentes superfícies de pavimentação;
- Avaliar experimentalmente, com recurso ao protótipo desenvolvido, o desempenho de diferentes superfícies e materiais a utilizar nas estruturas de pavimentos, de forma a quantificar alguns dados de entrada a considerar na nova metodologia LCA;
- Analisar os resultados obtidos com o protótipo através de técnicas de *Data Mining*, de forma a avaliar-se a possibilidade de desenvolver modelos de previsão do consumo tendo por base os dados obtidos nos ensaios com o protótipo, em função de determinadas características do pavimento e das condições de circulação;
- Avaliar a sustentabilidade de várias estruturas de pavimentos, com diferentes tipos de superfícies e sujeitas a diferentes cenários de manutenção, recorrendo à metodologia LCA desenvolvida anteriormente;
- Avaliar a influência das diferentes fases (incluindo a construção, conservação e utilização) no ciclo de vida das diferentes estruturas de pavimentos rodoviários analisadas.

1.3. Organização da Tese

A presente Tese de Doutoramento encontra-se dividida em 9 capítulos, estando estruturada da forma apresentada nos seguintes parágrafos.

No presente capítulo, denominado de “Introdução”, apresenta-se uma breve descrição do que se pretende investigar bem como uma contextualização desta investigação no panorama técnico-científico, com apresentação dos principais objetivos deste trabalho.

Nos dois capítulos seguintes apresentam-se os resultados da pesquisa bibliográfica efetuada. No Capítulo 2, denominado de “Pavimentos Rodoviários”, são apresentados os pavimentos rodoviários, de uma forma geral, abordando-se o tipo de pavimentos rodoviários existentes, os materiais utilizados, as características e os métodos de formulação das misturas, bem como os métodos de construção e reabilitação utilizados. A inclusão deste capítulo mais geral na presente Tese considerou-se pertinente de forma a facilitar a compreensão dos vários aspetos considerados na metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida apresentada no Capítulo 4.

No Capítulo 3, denominado de “Sustentabilidade dos Pavimentos Rodoviários”, apresentam-se também os resultados da revisão bibliográfica efetuada, mas agora claramente direcionado ao tema da sustentabilidade em estudo. Neste capítulo, depois de apresentadas as diferentes perceções de sustentabilidade, são abordados os diversos fatores relativos aos pavimentos rodoviários que a afetam, bem como as metodologias existentes para avaliação do ciclo de vida.

No Capítulo 4, denominado de “Desenvolvimento de uma Metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida dos Pavimentos Rodoviários”, é apresentada uma nova metodologia desenvolvida para avaliar todo o Ciclo de Vida dos Pavimentos Rodoviários, a qual procura incluir considerações inovadoras relativas à fase de utilização da estrada até agora negligenciadas pela generalidade das metodologias existentes, nomeadamente sobre a resistência ao rolamento e conseqüente consumo de combustível.

No Capítulo 5, denominado “Desenvolvimento de um Protótipo para Avaliação da Resistência ao Rolamento”, é apresentado um novo equipamento construído para avaliar a resistência ao rolamento oferecida por diferentes superfícies de pavimentos. A uma maior ou menor resistência ao rolamento corresponde um maior ou menor consumo de combustível dos veículos, o qual, multiplicado pelo tráfego de projeto numa estrada, permitirá determinar as poupanças no consumo de combustível ao longo do período de vida dessa estrada. Dessa forma, será possível estimar a redução não só dos custos (económicos) suportados pelos utentes, mas também da carga ambiental decorrente da variação no consumo de combustível. O protótipo desenvolvido terá, portanto, um papel fundamental na avaliação da sustentabilidade de diferentes soluções de pavimentação, a apresentar nos capítulos seguintes, pois os resultados obtidos no protótipo são essenciais à aplicação da metodologia LCA anteriormente descrita.

No Capítulo 6, denominado de “Caracterização das Superfícies dos Trechos e das Misturas a Utilizar no Estudo dos Pavimentos”, é efetuada uma caracterização superficial dos pavimentos aplicados na pista construída para realização dos ensaios com o protótipo, para avaliar a possível relação entre essas características e os valores de resistência ao rolamento determinados experimentalmente. Além disso, também é estudado o módulo de rigidez das misturas a utilizar nas estruturas de pavimentos que serão avaliadas posteriormente recorrendo à metodologia LCA desenvolvida neste trabalho, em especial para permitir um dimensionamento mais realista das estruturas avaliadas.

No Capítulo 7, denominado de “Avaliação Experimental da Resistência ao Rolamento”, são apresentados os resultados obtidos experimentalmente com recurso ao protótipo desenvolvido para avaliar a resistência ao rolamento. Neste capítulo procede-se à avaliação de quatro superfícies diferentes de pavimentos, registando-se o consumo de energia e esforço de torque, de forma a avaliar indiretamente a sua resistência ao rolamento e, conseqüentemente, o consumo de combustível inerente à circulação sobre cada uma delas. Os dados são depois analisados com recurso a técnicas de *Data Mining* para avaliar a relação entre as características superficiais e a resistência ao rolamento, e para determinar a sensibilidade das medições realizadas no novo equipamento. Em seguida, a partir do modelo desenvolvido que apresentou melhor desempenho, estimaram-se os resultados para condições de circulação reais, obtendo-se assim uma previsão do consumo de combustível que ocorreria em cada superfície de pavimento estudada.

No Capítulo 8, denominado de “Análise da Sustentabilidade de Diferentes Estruturas de Pavimentos”, procede-se à aplicação da metodologia LCA desenvolvida para avaliação da sustentabilidade de três estruturas de pavimentos diferentes, as quais preveem a utilização das diferentes superfícies para as quais se estimou o consumo de combustível no capítulo anterior. Foram ainda definidos quatro cenários, resultantes da adoção de diferentes estratégias de conservação ao longo do período de utilização da estrada, para se compreender qual a influência das fases de construção e manutenção no ciclo de vida dos pavimentos em estudo. As análises apresentadas neste capítulo foram efetuadas recorrendo à metodologia LCA desenvolvida anteriormente, sendo analisadas e comparadas as diferentes soluções, tanto em termos de impactos ambientais como de custos económicos.

Finalmente, no Capítulo 9, denominado de “Conclusões e Propostas para Desenvolvimentos Futuros”, são apresentadas as principais conclusões do trabalho realizado bem como algumas propostas que se consideram pertinentes para futuros trabalhos que venham a ser desenvolvidos nesta temática.

CAPÍTULO 2

PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS

2.1. Considerações gerais sobre pavimentos

Os pavimentos rodoviários têm como principal função assegurar uma superfície de rolamento livre e desempenada que permita a circulação de veículos em condições de segurança, conforto e economia, durante o período de vida do pavimento, devendo ser capazes de resistir às ações do tráfego e a uma variedade de condições climáticas a que estarão sujeitos.

O seu estado pode ser descrito por indicadores que se agrupam em dois tipos de requisitos exigidos aos pavimentos: a qualidade funcional e a qualidade estrutural (Branco *et al.*, 2005).

A qualidade funcional está relacionada com as exigências dos utentes, no que se refere ao conforto e segurança de circulação. Estas exigências estão diretamente relacionadas com as características superficiais do pavimento, nomeadamente, a regularidade, a textura, a cor e o ruído provocado pela circulação dos veículos. Conclui-se, portanto, que estas características estão intimamente relacionadas com a camada de desgaste do pavimento.

A qualidade estrutural diz respeito à capacidade do pavimento suportar as cargas dos veículos sem sofrer alterações para além de determinados valores limites. Esta está dependente de características como a integridade, a regularidade e o desempenho da superfície, traduzidas pela ausência de fendas, covas, depressões e outras deformações permanentes diferenciais e está relacionada com o comportamento estrutural de todo o pavimento (Branco *et al.*, 2005).

Relativamente à sua constituição, um pavimento rodoviário consiste num sistema multiestratificado, composto por um conjunto de camadas com espessura finita, apoiadas na fundação constituída pelo terreno natural, o qual pode ser melhorado superficialmente, formando o leito do pavimento.

Nas camadas que compõem um pavimento podem distinguir-se, pela função que desempenham, a camada superficial ou “camada de desgaste” e o corpo do pavimento. A camada de desgaste tem a função de assegurar as características funcionais, de modo a contribuir para uma circulação com conforto e com segurança, e de impermeabilizar o pavimento, evitando a entrada de água exterior para as camadas inferiores e para o solo de fundação (Costa, 2008). O corpo do pavimento, o principal responsável pela capacidade do pavimento em suportar as cargas do tráfego, compreende as camadas estabilizadas com ligantes (betuminosos ou hidráulicos) e as camadas granulares, as quais se dispõem, normalmente, com qualidade e resistência decrescentes, de cima para baixo, em consonância com a progressiva redução dos esforços em profundidade (Costa, 2008).

2.2. Tipos de pavimentos

Dependendo do tipo de materiais utilizados nas camadas superiores, resultam diferentes tipos de pavimentos, os quais se comportam de maneiras diferentes quando sujeitos às cargas dos veículos combinadas com as condições climáticas. Assim, e em função do tipo de materiais e da sua deformabilidade, podem distinguir-se três tipos de pavimentos: flexíveis, rígidos e semirrígidos.

2.2.1. Pavimentos flexíveis

Os pavimentos flexíveis são constituídos por camadas betuminosas (camadas superiores) e granulares (camadas inferiores), as quais se deformam por ação das cargas aplicadas. A sua constituição pode ser muito diversa, em função da intensidade de tráfego, da capacidade de carga da fundação e das características dos materiais disponíveis, as quais, por sua vez, dependem das condições climáticas.

Assim, quando o tráfego é pouco agressivo, e se dispõe de materiais granulares de boa qualidade a custo favorável, podem ser projetados e construídos pavimentos onde é preponderante a componente granular. Em contrapartida, perante um tráfego intenso, numa região com reduzidos recursos quanto a

materiais granulares de qualidade, e face a uma fundação de reduzida capacidade de suporte, será necessário considerar um pavimento integrando várias camadas betuminosas, com espessura total significativa (Branco *et al.*, 2005).

Os esforços instalados ao nível das diferentes camadas determinam, em geral, uma evolução típica dos pavimentos flexíveis, em direção a dois estados últimos de ruína, o fendilhamento das camadas betuminosas e a deformação permanente das camadas em geral, controlada ao nível da fundação, sendo estes estados considerados pelos principais métodos de dimensionamento (Maganinho, 2013).

2.2.2. Pavimentos rígidos

Os pavimentos rígidos são constituídos por uma laje em betão de cimento, podendo assentar diretamente sobre a fundação (no caso de vias sujeitas a um tráfego reduzido) ou conter outras camadas entre a fundação e a laje de betão, nomeadamente, camadas de betão pobre (betão de cimento menos resistente), de material granular tratado com cimento, normalmente designado de agregado de granulometria extensa tratado com cimento – AGECE, ou de solo-cimento.

A elevada resistência deste tipo de pavimentos, devida à resistência à flexão do betão de cimento, faz com que eles não sofram deformações acentuadas, mesmo quando submetidos a condições severas de tráfego pesado, intenso e lento, e a elevadas temperaturas. Pela mesma razão, as tensões verticais provocadas pelas cargas distribuem-se sobre uma grande área da laje de betão e, deste modo, a pressão vertical que atinge a fundação corresponde a uma pequena fração da pressão de contacto dos pneus (Branco *et al.*, 2005).

Segundo Kraemer e Val (1996)¹, os pavimentos rígidos podem ser agrupados em cinco categorias que se distinguem sobretudo pelo modo como é controlado o fendilhamento por retração:

- pavimentos de betão não armado, com juntas transversais e longitudinais, dotadas ou não de barras de transferência de cargas (passadores);
- pavimentos de betão armado, com juntas, com ou sem passadores;
- pavimentos de betão armado contínuo;
- pavimentos de betão pré-esforçado;

¹ Citado por Branco *et al.* (2005)

- pavimentos formados por elementos pré-fabricados.

2.2.3. Pavimentos semirrígidos

Os pavimentos semirrígidos compreendem uma combinação de camadas betuminosas e em betão. Normalmente apresentam uma espessura total entre 20 e 50 cm, sendo as camadas de betão utilizadas como camadas de base, enquanto as betuminosas são utilizadas como camadas superiores, geralmente apenas de desgaste (InIR, 2009c). Este tipo de pavimento pode apresentar alguns problemas devido à propensão das camadas em cimento para fendilhar, fenómeno que tenderá a refletir-se nas camadas superiores. De forma a evitar-se ou retardar-se essa propagação poderá interpor-se uma camada retardadora da propagação de fendas - SAMI (*Stress Absorbing Membrane Interlayer*) entre as camadas de betão e as betuminosas (Nunn e Potter, 1993).

Pode ainda considerar-se a existência de um quarto tipo de pavimento denominado como semiflexível, constituído por uma camada de desgaste com um material designado por “*Grouted Macadam*”. Na sua essência, este material composto compreende um esqueleto de mistura betuminosa porosa sobre o qual é despejada uma calda de cimento preenchendo completamente os espaços vazios. Este tipo de pavimento tem o potencial de combinar as melhores qualidades de pavimentos flexíveis e rígidos, isto é, a ausência de juntas, característica dos pavimentos betuminosos, e uma vida longa e com elevada capacidade de carga, característica dos pavimentos de betão, fornecendo ainda, pela sua superfície impermeável, uma boa proteção à fundação contra a entrada de água (Oliveira, 2006).

2.3. Materiais utilizados nos pavimentos

Apresentam-se de seguida, de forma resumida, as características dos principais materiais elementares utilizados na construção dos pavimentos.

2.3.1. Materiais para camadas não ligadas

Os materiais para camadas não ligadas incluem solos selecionados, agregados britados (naturais e reciclados) de granulometria extensa – ABGE, agregado fino e material drenante com agregado britado.

De acordo com o Caderno de Encargos da Estradas de Portugal (EP, 2014a), no caso dos ABGE, para além dos requisitos definidos na Norma NP EN 13242 (2002), devem também ser considerados os requisitos definidos na EN 13285 (2010).

2.3.2. Agregados

Os agregados consistem nos materiais granulares utilizados na construção, podendo ser naturais, artificiais ou reciclados. De uma forma geral estes devem apresentar-se são (ou pouco alterados), homogêneos e isentos de matéria orgânica ou outras substâncias como vidro, madeira ou plástico, bem como ser pouco suscetíveis à meteorização (EP, 2014a).

Em função da sua dimensão, os agregados podem ser classificados de fileres, agregados finos, grossos e de granulometria extensa e, em função da massa volúmica das suas partículas, podem ser classificados em agregados de densidade normal ou agregados leves (InIR, 2011).

2.3.3. Ligantes betuminosos

De acordo com o Caderno de Encargos da Estradas de Portugal, um “Ligante Betuminoso” é um material adesivo contendo betume que pode estar sob a forma de não modificado, modificado ou emulsionado, e que abrange os seguintes tipos:

- Betumes de pavimentação;
- Betumes duros;
- Betumes modificados;
- Betumes borracha (BB);
- Emulsões betuminosas.

O betume é um material praticamente não volátil, adesivo e impermeável à água, derivado do petróleo bruto, e que é completamente ou quase todo solúvel em tolueno, muito viscoso e quase sólido à temperatura ambiente (EP, 2014a).

Os betumes de pavimentação são obtidos por processos de refinação do petróleo bruto, sendo classificados de acordo com o valor da penetração a 25 °C, utilizando um intervalo definido pelos

limites inferior e superior desse parâmetro. Em Portugal, nas misturas betuminosas a quente, são normalmente empregues os betumes de pavimentação 35/50 ou 50/70.

As propriedades e os respetivos métodos de ensaio adequados para a caracterização deste tipo de betumes encontram-se especificados na Norma NP EN 12591 (2011).

Os betumes 10/20 e 15/25 são considerados betumes duros, devendo as suas características estar de acordo com a Norma NP EN 13924 (2011). Estes betumes são utilizados no fabrico de misturas betuminosas de alto módulo.

O betume modificado é um betume cujas propriedades reológicas foram modificadas durante o fabrico pela utilização de um ou mais agentes químicos, devendo as suas características estar de acordo com a Norma NP EN 14023 (2013). O termo “agente químico” inclui a borracha natural, os polímeros sintéticos, o enxofre e certos compostos organo-metálicos. Os agentes químicos primários mais usados para a modificação do betume são os polímeros elastoméricos termoplásticos, tais como o SBS (estireno-butadieno-estireno), e os polímeros plastoméricos termoplásticos, tais como o EVA (etileno-vinil-acetato). Também se utiliza com frequência o látex, na forma de policloropropeno, a borracha natural e o granulado de borracha (InIR, 2009a).

Estes betumes são identificados pela sigla PMB (*Polymer Modified Bitumen*), seguida da sua classificação de acordo com os limites inferior e superior da penetração a 25 °C, e do limite inferior da temperatura de amolecimento após um hífen. Em Portugal são normalmente utilizados os betumes modificados com polímeros PMB 45/80-55 e PMB 65/105-80 a empregar em misturas betuminosas drenantes e em misturas betuminosas rugosas, respetivamente, podendo ainda ser aplicados os betumes PMB 10/40-70 e PMB 25/55-65 em misturas betuminosas de alto módulo (InIR, 2009a).

O betume borracha (BB) é um betume fabricado com a incorporação de granulado de borracha, por via húmida, usando borracha reciclada de pneus usados. Dependendo da percentagem de granulado de borracha no betume borracha, este pode ser dividido em três tipos (EP, 2014a):

- BBB ou betume borracha de baixa percentagem de granulado de borracha, fabricado com uma percentagem de granulado de borracha igual ou inferior a 8% em relação à massa total de ligante, tratando-se de um betume de baixa viscosidade;

- BBM ou betume borracha de média percentagem de granulado de borracha, modificado com uma percentagem de granulado de borracha entre 10% e 14% em relação à massa total de ligante, tratando-se de um betume de viscosidade média;
- BBA ou betume borracha de alta percentagem de granulado de borracha, modificado com uma percentagem de granulado de borracha igual ou superior a 18% em relação à massa total de ligante, tratando-se de um betume de alta viscosidade.

Os betumes borracha de baixa e média percentagem são produzidos em fábrica, enquanto o betume borracha de alta percentagem de granulado de borracha é produzido *in situ* (em estaleiro), na altura de fabrico das misturas betuminosas, por não ser suficientemente estável ao armazenamento.

Para o fabrico de betume borracha, o betume base a modificar é geralmente um betume de penetração nominal 35/50 ou 50/70, conforme a Norma NP EN 12591 (2011), sendo seleccionado em função das características exigidas no projeto.

Finalmente, as emulsões betuminosas são constituídas por partículas de betume em suspensão em água, cuja estabilidade é garantida por um agente emulsionante, podendo ser classificadas de catiónicas ou aniónicas em função da carga eléctrica atribuída às partículas de betume pelo agente emulsionante. As emulsões betuminosas aniónicas usam-se em condições de tempo seco e com agregados eletropositivos, como o calcário e o basalto, e as catiónicas são usadas tanto em tempo seco como húmido, e podem também ser aplicadas com agregados eletronegativos, tais como o granito e o quartzito (Figueiredo, 2011). Utilizam-se por isso, atualmente, na maioria das aplicações em pavimentos rodoviários, emulsões catiónicas, por permitirem uma aplicação mais generalizada em diferentes condições climáticas e com diferentes tipos de agregados. As emulsões betuminosas catiónicas deverão cumprir os requisitos da Norma Europeia EN 13808 (2013).

A designação das emulsões traduz-se numa expressão alfanumérica, a qual pode conter até 7 dígitos. O primeiro é a letra “C”, a qual indica a carga positiva das partículas de betume. Seguem-se depois 2 dígitos indicando a percentagem nominal de betume residual. Seguir-se-ão uma, duas ou três letras, indicando o tipo de ligante, correspondendo as letras “B”, “P” e “F” ao betume de pavimentação, à adição de polímeros e à adição de mais de 2% de fluxante, respetivamente. O último dígito, correspondente ao índice de rotura, e consiste num número representando a respetiva classe.

2.3.4. Ligantes hidráulicos

2.3.4.1. Cimento

De acordo com as Normas Europeias, o cimento (CEM) é um ligante hidráulico, ou seja, um material inorgânico finamente moído que, quando misturado com água, forma uma pasta que faz presa e endurece devido a reações e processos de hidratação e que, depois do endurecimento, conserva a sua resistência mecânica e estabilidade mesmo debaixo de água (EP, 2014a). As Normas Europeias que definem os requisitos aplicáveis aos cimentos são a NP EN 197-1 (2012) e a NP EN 197-2 (2014).

2.3.4.2. Cal

A Norma Europeia que define os requisitos aplicáveis à cal é a NP EN 459-1 (2015). Segundo esta norma, a cal é um material que abrange qualquer forma física e química sob a qual pode aparecer o óxido de cálcio e/ou magnésio (CaO e MgO) e/ou os respetivos hidróxidos (Ca(OH)₂ e Mg(OH)₂).

2.3.4.3. Aditivos e adjuvantes

Importa também referir a possibilidade de considerar aditivos e adjuvantes nas misturas tratadas com ligantes hidráulicos e betão hidráulico. Os aditivos a considerar encontram-se previstos na Norma Europeia NP EN 206-1 (2007), sendo nela definidas como um material finamente dividido utilizado no betão com a finalidade de melhorar certas propriedades ou alcançar propriedades especiais.

Os adjuvantes para betão são produtos incorporados durante o processo de amassadura do betão, com uma dosagem não superior a 5% em massa da dosagem de cimento, para modificar as propriedades do betão fresco ou endurecido, devendo satisfazer a Norma Europeia NP EN 934-2 (2009).

2.3.5. Água

De acordo com o Caderno de Encargos da Estradas de Portugal (EP, 2014a), a água a empregar na execução de camadas não ligadas, de misturas betuminosas e de misturas tratadas com ligantes hidráulicos e betão hidráulico, deverá ser doce, limpa e não deverá conter óleos, ácidos, matérias

orgânicas ou quaisquer outros produtos prejudiciais que possam influenciar os tempos de presa e o desenvolvimento da resistência da mistura.

No caso da água utilizada nas misturas tratadas com ligantes hidráulicos e betão hidráulico, esta deverá ainda obedecer aos requisitos da Norma Europeia NP EN 1008 (2003).

2.4. Misturas aplicadas nas camadas ligadas do pavimento

2.4.1. Misturas com ligantes betuminosos

As misturas que compõem as camadas com ligantes betuminosos podem dividir-se em dois grupos: tradicionais e especiais. Por misturas tradicionais considera-se normalmente o betão betuminoso em camada de desgaste, a mistura betuminosa densa em camada de regularização e o macadame betuminoso. As restantes misturas, como argamassas betuminosas, misturas betuminosas de alto módulo ou betões betuminosos drenantes, são designadas de especiais. Apresentam-se de seguida as principais características das várias misturas betuminosas utilizadas neste tipo de pavimentos.

2.4.1.1. Betão betuminoso

O betão betuminoso consiste numa mistura destinada sobretudo à construção de camadas de desgaste, tendo os agregados uma dimensão máxima de 10 mm ou de 14 mm. Por ser uma mistura fechada e resistente, o betão betuminoso também pode ser utilizado como camada de regularização subjacente a camada de betão betuminoso drenante ou camada delgada de desgaste, ou como camada de ligação, não devendo a espessura de uma camada deste tipo ser superior a 5 cm (Branco *et al.*, 2005).

Para estas misturas os teores de betume utilizados situam-se entre 5 e 6%, a porosidade entre 3 e 6% e o valor do VMA (volume de vazios da mistura compactada que resultaria retirando-se todo o betume sem que se alterasse a posição dos agregados) não deve ser inferior a 14% (Branco *et al.*, 2005).

A designação europeia para este tipo de mistura, de acordo com a Norma NP EN 13108-1 (2011), consiste na sigla AC (referente à designação do produto, cujo termo em inglês é *“Asphalt Concrete”*), seguida da abertura do peneiro superior do agregado na mistura (em milímetros), dos termos “bin”, “reg” ou “surf” (caso se trate de uma camada de ligação, de regularização ou de desgaste, cujos termos em inglês são *“binder course”*, *“regulating course”* ou *“surface course”*, respetivamente) e da designação do ligante utilizado. A nova designação europeia para as misturas betuminosas pode, no entanto, conduzir à mesma designação para misturas betuminosas distintas, pelo que foram adicionadas siglas referentes às iniciais da designação da mistura em português (EP, 2014a). Surgirá assim, entre parênteses, a abreviatura do tipo de mistura, nomeadamente BB ou BBr, caso se trate de um Betão Betuminoso ou de um Betão Betuminoso rugoso, este último apenas utilizado em camadas de desgaste. A título de exemplo, a designação de uma mistura de betão betuminoso para camada de desgaste, produzido com agregados com a dimensão máxima de 14 mm e um betume 35/50 será, portanto, AC 14 surf 35/50 (BB).

2.4.1.2. Microbetão betuminoso rugoso

O microbetão betuminoso rugoso é utilizado na construção de camadas de desgaste delgadas, geralmente com espessuras entre 2,5 e 3,5 cm. A mistura de agregados é realizada utilizando as frações 0/2 e 6/10, resultando uma granulometria 0/10 com descontinuidade na fração 2/6. Nestas misturas utiliza-se, normalmente, um ligante modificado com polímeros. Esta solução pode também ser considerada um tratamento superficial, uma vez que a sua contribuição para a resistência estrutural do pavimento pode ser praticamente desprezada.

A designação atual deste tipo de mistura, à semelhança do que foi referido para o Betão Betuminoso, e também de acordo com a Norma NP EN 13108-1 (2011), consiste na sigla AC (do termo *“Asphalt Concrete”*), seguida da abertura do peneiro superior do agregado na mistura (em milímetros), do termo “surf” (por se tratar de uma camada de desgaste, cujo termo em inglês é *“surface course”*) e da designação do ligante utilizado. Surgirá também, entre parênteses, a abreviatura do termo micro Betão Betuminoso rugoso, neste caso, mBBr. A título de exemplo, a designação de uma mistura de microbetão betuminoso rugoso produzida com agregados com a dimensão máxima de 10 mm, betume PMB 25/55 e destinada a aplicação em camada de desgaste será, portanto, AC 10 surf PMB 25/55 (mBBr).

2.4.1.3. Mistura betuminosa densa

A mistura betuminosa densa, normalmente utilizada na realização de camadas de ligação ou de regularização, é formada por um agregado com uma granulometria do tipo 0/20. De acordo com Branco *et al.* (2005), o teor em betume usado é geralmente superior a 5%, apresentando uma porosidade entre 3 e 5% e um valor de VMA não inferior a 13%.

Uma vez mais, de acordo com a Norma NP EN 13108-1 (2011), a designação atual deste tipo de mistura consiste na sigla AC (do termo "*Asphalt Concrete*"), seguida da abertura do peneiro superior do agregado na mistura (em milímetros), dos termos "bin" ou "reg" (caso se trate de uma camada de ligação ou de regularização, cujos termos em inglês são "*binder course*" ou "*regulating course*", respetivamente) e da designação do ligante utilizado. Surgirá também, entre parênteses, a abreviatura do termo Mistura Betuminosa Densa, neste caso MBD. A título de exemplo, a designação de uma mistura betuminosa densa produzida com agregados com a dimensão máxima de 20 mm e um betume 35/50 a aplicar numa camada de regularização será, portanto, AC 20 reg 35/50 (MBD).

2.4.1.4. Macadame betuminoso

O macadame betuminoso pode ser aplicado na construção de camadas de base, ligação e regularização. Genericamente consiste numa estrutura de agregados com uma granulometria extensa, com uma dimensão máxima de 37,5 mm ou, em alternativa, de 25 mm (Branco *et al.*, 2005). Ainda de acordo com os mesmos autores, a percentagem de finos (material de dimensões inferiores a 0,075 mm) geralmente varia entre 2 e 8%, o teor de betume entre 4 e 5% e a porosidade entre 4 e 8%.

A designação atual deste tipo de mistura é igualmente definida pela Norma NP EN 13108-1 (2011), e consiste na sigla AC (do termo "*Asphalt Concrete*"), seguida da abertura do peneiro superior do agregado na mistura (em milímetros), dos termos "base", "bin" ou "reg" (caso se trate de uma camada de base, de ligação ou de regularização, cujos termos em inglês são "*base course*", "*binder course*" ou "*regulating course*", respetivamente) e da designação do ligante utilizado. Surgirá também, entre parênteses, a abreviatura do termo Macadame Betuminoso, neste caso, MB. A título de exemplo, a designação de uma mistura de macadame betuminoso produzida com agregados com dimensão máxima de 20 mm, betume 35/50 e destinada a aplicação em camada de base será, portanto, AC 20 base 35/50 (MB).

2.4.1.5. Argamassa betuminosa

A argamassa betuminosa consiste numa mistura usada em camadas de regularização quando se pretendem usar espessuras variáveis entre 2 e 4 cm (pode servir de reperfilamento em ações de reabilitação). Quando produzida com ligante modificado, na reabilitação de pavimentos fendilhados, também pode ser usada como camada retardadora do processo de propagação de fendas. O valor de VMA mínimo é de 15% e a porosidade pode variar entre 3 e 6% para camadas de regularização e entre 5 e 7% para camadas de desgaste.

Uma vez mais, e à semelhança do que foi apresentado para as misturas anteriores, a Norma NP EN 13108-1 (2011), define a designação atual deste tipo de mistura, a qual consiste na sigla AC (do termo "*Asphalt Concrete*"), seguida da abertura do peneiro superior do agregado na mistura (em milímetros), dos termos "bin" ou "reg" (caso se trate de uma camada de ligação ou de regularização, cujos termos em inglês são "*binder course*" ou "*regulating course*", respetivamente) e da designação do ligante utilizado. Surgirá também, entre parênteses, a abreviatura do termo Argamassa Betuminosa, neste caso, AB. A título de exemplo, a designação de uma mistura de argamassa betuminosa produzida com agregados de granulometria do tipo 0/4, betume PMB 25/55 e destinada a aplicação em camada de regularização será, portanto, AC 4 reg PMB 25/55 (AB).

2.4.1.6. Mistura betuminosa de alto módulo

As misturas betuminosas de alto módulo de deformabilidade destinam-se à realização de camadas que apresentem um melhor comportamento quando comparadas com as soluções tradicionais, sendo utilizadas sobretudo em camadas de base e de ligação (EP, 2014a). A melhoria do comportamento destas misturas é conseguida utilizando materiais diferentes, sendo a principal diferença o recurso a uma elevada dosagem (mais de 5%) de um betume duro (10/20, por exemplo), aumentando o ponto de amolecimento anel e bola e tornando o betume e a mistura menos suscetíveis à temperatura (Branco *et al.*, 2005).

Os elevados módulos de deformabilidade destas misturas são conseguidos, quase exclusivamente, pela utilização de ligantes mais duros, os quais devem ser aquecidos a temperaturas mais elevadas que os convencionais, de modo a obter a viscosidade ideal para a mistura e compactação. Assim, antes da

mistura, estes devem ser aquecidos a temperaturas entre 160 e 180 °C, o espalhamento deve ocorrer entre 145 e 165 °C e a compactação a 140 °C (Branco *et al.*, 2005).

Da mesma forma que as misturas anteriormente apresentadas, a designação atual deste tipo de mistura consiste, de acordo com a Norma NP EN 13108-1 (2011), na sigla AC (do termo “*Asphalt Concrete*”), seguida da abertura do peneiro superior do agregado na mistura (em milímetros), dos termos “base” ou “bin” (caso se trate de uma camada de base ou de ligação, cujos termos em inglês são “*base course*” ou “*binder course*”, respetivamente) e da designação do ligante utilizado. Surgirá também, entre parênteses, a abreviatura do termo Mistura Betuminosa de Alto Módulo, neste caso, MBAM. A título de exemplo, a designação de uma mistura betuminosa de alto módulo produzida com agregados de granulometria do tipo 0/16, betume 10/20 e destinada a aplicação em camada de ligação será, portanto, AC 16 bin 10/20 (MBAM).

2.4.1.7. Betão betuminoso drenante

O betão betuminoso drenante consiste numa mistura betuminosa aberta (porosidade entre 22 e 30%), de granulometria descontínua, com diâmetro nominal máximo do agregado de 12,5 mm. Esta mistura é usada normalmente como camada de desgaste com cerca de 4 cm de espessura, a qual permite que a drenagem da água precipitada sobre o pavimento ocorra pelo interior desta camada até às bermas, e não à superfície como acontece com as misturas convencionais, melhorando assim a visibilidade em tempo de chuva (Figura 1).

Esta mistura é utilizada na construção de pavimentos novos, mas também na reabilitação das características superficiais de pavimentos de estradas submetidas a tráfego que circula a velocidades elevadas (como IP's e IC's) localizadas em regiões de elevada pluviosidade.

O betume a utilizar na produção de betão betuminoso drenante é habitualmente modificado com polímeros do tipo PMB 45/80-55 ou PMB 65/105-80, tal como foi anteriormente referido.



Figura 1 – Diferença na visibilidade com chuva entre um pavimento com camada de desgaste convencional, na faixa da direita, e com camada de desgaste drenante, na faixa da esquerda (GRAMME, 2009)

Além da melhoria das condições de drenagem do pavimento, Branco *et al.* (2005) referem ainda que este tipo de camada de desgaste apresenta outras vantagens como a redução do ruído produzido pelo rolamento dos pneus, em especial em condições molhadas.

Os mesmos autores apontam, no entanto, algumas limitações deste tipo de soluções, como a sua reduzida contribuição estrutural, apresentando estas misturas sensivelmente metade da capacidade resistente de uma mistura densa convencional. Outro problema é a possível colmatação dos poros (perda de permeabilidade) que, por vezes, ocorre ao fim de 5 ou 6 anos, deixando a camada de cumprir as suas funções drenantes, bem como a maior exposição do filme de betume que envolve os agregados às condições climáticas, favorecendo o seu envelhecimento precoce.

Ao contrário das misturas anteriores, a designação europeia para este tipo de mistura encontra-se definida por outra Norma, neste caso a EN 13108-7 (2006), e inclui, além da sigla PA (referente à designação do produto, cujo termo em inglês é *"Porous Asphalt"*), a abertura do peneiro superior do agregado na mistura (em milímetros), e a designação do ligante utilizado. À semelhança do grupo do betão betuminoso, foram acrescentadas siglas referentes às iniciais da designação da mistura em português (BBd, no caso do Betão Betuminoso drenante). A título de exemplo, a designação de uma mistura de betão betuminoso drenante produzido com agregados de granulometria do tipo 0/12,5 e um betume PMB 45/80-55 será, portanto, PA 12,5 PMB 45/80-55 (BBd).

2.4.2. Misturas com ligantes hidráulicos

Também relativamente às misturas com ligantes hidráulicos existem vários tipos, variando as suas características consoante se destinam a ser aplicadas em camadas de sub-base, de base ou de desgaste. O MACOPAV (JAE, 1995) divide estas misturas em três grupos:

1. Os betões de cimento, aplicados em camadas de desgaste de pavimentos rígidos, considerando betões com resistências características à tração por flexão, aos 28 dias de idade, de 4,0 a 4,5 MPa e uma quantidade de cimento entre 300 e 350 kg/m³.
2. As misturas de agregados com ligantes hidráulicos, com menor dosagem de ligante, que podem ser aplicadas em camadas de base ou sub-base, sob camadas betuminosas (pavimentos semirrígidos) ou sob as lajes de betão de cimento (pavimentos rígidos). No caso dos pavimentos rígidos, para além de se melhorarem as condições de apoio das lajes de betão de cimento, pretende-se limitar o fenómeno de erosão das camadas de base, o qual pode ser bastante reduzido adotando uma dosagem mínima de ligante de 140 kg/m³ de mistura. No caso dos pavimentos semirrígidos é necessário conferir às misturas aplicadas em camada de base uma resistência mínima à tração em compressão diametral de 1,0 MPa, aos 28 dias, tendo em vista dotar a estrutura do pavimento de uma adequada resistência à fadiga.
3. As misturas de solo-cimento fabricadas em central, utilizadas em camada de sub-base, desde que se disponha de solos granulares com adequadas características granulométricas e de homogeneidade.

De seguida, são apresentadas com mais algum pormenor as características dos principais tipos de misturas produzidas com ligantes hidráulicos, que são aplicadas em camadas de pavimentos.

2.4.2.1. Betão de cimento

O betão consiste na mistura de agregados britados, areia, cimento e água, podendo conter ainda algum aditivo que melhore as suas características de resistência e de trabalhabilidade.

O betão de cimento para aplicação em camadas de desgaste deve possuir, entre outras, muito boas características mecânicas. Para tal, a quantidade de cimento utilizada por metro cúbico de betão não deve ser inferior a 300 kg (podendo chegar aos 350 kg, conforme referido anteriormente) e a razão

água/cimento não pode exceder o valor de 0,5. Para estradas da rede fundamental (integrando os Itinerários Principais – IP's) o betão deve apresentar uma resistência característica à tração por flexão de 4,5 MPa, aos 28 dias de idade.

A Norma Portuguesa NP EN 206-1 (2007) estabelece os requisitos a que o betão deve obedecer no que respeita à consistência, massa volúmica, resistência, durabilidade e proteção contra a corrosão do aço embebido, tendo em conta o processo de fabrico e execução.

2.4.2.2. Betão pobre

O betão pobre consiste num tipo de betão semelhante ao descrito acima, sendo a principal diferença a quantidade de cimento que entra na sua composição que, no caso do betão pobre, é menor.

2.4.2.3. Agregado de granulometria extensa estabilizado com cimento

Este material resulta da mistura de agregados de granulometria extensa (agregados grossos e finos) com cimento, podendo ser aplicado em camadas de sub-base, base e regularização. O fuso granulométrico e características dos agregados encontram-se definidos no Caderno de Encargos da Estradas de Portugal (EP, 2014a), o qual define também que, quando aplicado em camadas de base e regularização, o teor em ligante a incorporar na mistura será no mínimo de 110 kg/m³.

A aplicação deste material preconiza o emprego ulterior de uma rega com emulsão betuminosa para proteção contra a evaporação da água necessária à cura do material, e de uma camada de gravilha para proteção contra as ações mecânicas no caso de a camada estar sujeita ao tráfego de obra.

2.4.2.4. Solos estabilizados com cal ou cimento

Nas zonas em que os solos não têm características satisfatórias, ou quando se pretenda fazer, com os solos, uma camada mais resistente, recorre-se geralmente à sua estabilização, misturando-os com outros materiais (Branco *et al.*, 2005). Para além da possibilidade de estabilização mecânica, misturando-os com outros solos, pode também recorrer-se à sua mistura com ligantes hidráulicos, isto é, com cal ou cimento.

Os solos a utilizar deverão estar isentos de matéria orgânica, de materiais expansivos e de quaisquer outros produtos prejudiciais que possam afetar a ligação com o ligante e influenciar os tempos de presa e o desenvolvimento da resistência da mistura (EP, 2014a). Adicionalmente, os solos deverão obedecer aos requisitos definidos nas Normas NP EN 14227-10 (2013) e NP EN 14227-11 (2013).

Branco *et al.* (2005) apontam duas técnicas para a utilização deste tipo de estabilização. Uma, designada de “solo tratado com cimento”, consiste na adição de pequenas quantidades de cimento (3 a 4% de teor em cimento) em estradas com pouco tráfego, visando essencialmente diminuir a suscetibilidade à água do solo e aumentar ligeiramente a sua resistência. A outra técnica, designada de “solo-cimento”, consiste na adição de dosagens de cimento maiores, conduzindo a um material de resistência mais elevada que pode ser usado como camada de sub-base ou mesmo de base em pavimentos de estradas com tráfego significativo. No solo tratado com cimento a estabilização é feita no local. No solo-cimento isso também é possível, embora, para utilizações mais importantes, a mistura seja feita em betoneira ou em central para garantir uma melhor qualidade e homogeneidade.

2.5. Caracterização e fabrico de misturas com ligantes betuminosos

2.5.1. Características das misturas com ligantes betuminosos

Dependendo do tipo de camada a construir, as características a exigir às respetivas misturas serão diferentes. Assim, dependendo do tipo de camada, tais exigências poderão relacionar-se com o desempenho mecânico, a segurança ou o conforto dos utentes, sendo transversais a todas elas, as preocupações com a economia, durabilidade e facilidade de execução.

De uma forma geral, podem apontar-se a estabilidade, durabilidade, flexibilidade, resistência à fadiga, aderência, impermeabilidade e trabalhabilidade como as principais características exigidas às misturas betuminosas. Por essa razão, com base nas descrições do Yoder e Witczak (1975) e de Branco *et al.* (2005), apresentam-se de seguida algumas considerações sobre estas características.

A estabilidade é a capacidade da mistura para resistir, com pequena deformação, às cargas que lhe são impostas em serviço. Esta propriedade está dependente, essencialmente, do atrito interno e da

coesão, as quais dependem de aspetos como a textura dos materiais, a granulometria dos agregados, a forma das partículas, a densidade da mistura, bem como a quantidade e tipo de betume. Também uma correta compactação das misturas é essencial para a sua estabilidade. A quantidade de betume utilizada tem uma influência significativa sobre a estabilidade. Uma quantidade excessiva de ligante conduzirá à lubrificação das partículas de agregado e conseqüente redução do atrito interno, mas a coesão resulta da introdução de betume na mistura. Conclui-se assim que a estabilidade aumenta com a quantidade de ligante até um certo valor máximo, a partir do qual decresce.

A durabilidade pretende avaliar a resistência à desintegração causada pelo tráfego e pelas solicitações climáticas, como a oxidação do betume, perda de componentes por volatilização ou deterioração dos agregados devido a ciclos de gelo/degelo. Esta propriedade pode ser melhorada utilizando maiores quantidades de betume, materiais de granulometria contínua e efetuando uma boa compactação. Não obstante dos inconvenientes acima referidos, para a estabilidade da mistura, provocados pela utilização de quantidades excessivas de betume, a utilização de maiores percentagens de betume permite reduzir o seu envelhecimento, melhorando capacidade de ligação entre os agregados, permitindo ainda reduzir o volume de vazios, dificultando a entrada de ar e água para o interior da mistura. A solução passa assim por estabelecer um compromisso que, utilizando uma percentagem de betume tão elevada quanto possível, não prejudique demasiado a estabilidade da mistura.

A flexibilidade de uma mistura corresponde à capacidade desta se adaptar aos movimentos do seu suporte, nomeadamente a assentamentos diferenciais dos aterros ou a compressão de algumas zonas do pavimento por ação do tráfego, sem que ocorra o seu fendilhamento. Surge assim a necessidade de produzir misturas com suficiente flexibilidade, a qual aumenta com o aumento da percentagem de betume, melhorando ainda com a utilização de agregados de granulometria relativamente aberta.

A aplicação de repetidas cargas, originadas pela passagem dos veículos, provoca nos pavimentos extensões de tração, e a acumulação de extensões irreversíveis leva à abertura de fendas. A resistência à fadiga das misturas betuminosas será tanto melhor quanto maior for a durabilidade (e a percentagem de betume), tendo também as misturas densas um melhor desempenho que as abertas.

A aderência aos pneus dos veículos ao pavimento é outra característica essencial das misturas betuminosas, sobretudo com tempo de chuva. Por essa razão não se deve utilizar betume em excesso,

para que este não exsude originando uma superfície demasiado lisa. Os agregados devem possuir uma textura superficial rugosa e boa resistência ao desgaste, para garantir uma boa drenagem superficial.

Outra característica das misturas betuminosas é a impermeabilidade, isto é, devem também oferecer uma boa resistência à passagem da água e do ar através das camadas do pavimento, o que é fundamental para manter as propriedades das camadas do pavimento bem como da sua fundação. A trabalhabilidade é outra característica a observar nas misturas betuminosas de modo a assegurar que estas possam ser colocadas e compactadas com facilidade.

2.5.2. Fabrico de misturas com ligantes betuminosos

O fabrico das misturas betuminosas ocorre em centrais betuminosas, isto é, em instalações industriais destinadas à mistura dos vários componentes, como agregados e betume, de modo a obter-se o tipo de mistura pretendida.

No que respeita à sua portabilidade, as centrais podem ser classificadas como portáteis, semi-portáteis e fixas (Wright e Paquette, 1987)². As centrais portáteis são, sobretudo, pequenas unidades auto-transportáveis, mas também grandes centrais em que as unidades que as compõe são facilmente desmontáveis e auto-transportáveis. As semi-portáteis têm de ser desmontadas e transportadas através de meios como camião ou comboio, sendo depois montadas de novo noutra local. As centrais fixas, como se infere pela sua designação, estão sempre no mesmo local.

Outra classificação habitual das centrais betuminosas é relativa à forma como estas produzem as misturas, existindo, neste caso, dois tipos de centrais: contínuas e descontínuas. Nas centrais contínuas não há uma pesagem exata dos materiais durante o processo de fabrico, havendo antes uma alimentação contínua dos agregados e do betume, que se misturam no tambor secador/misturador, resultando numa produção contínua da mistura que depois é encaminhada para camiões ou para um silo de armazenamento, funcionando desta forma em contínuo. Nas centrais descontínuas as quantidades previstas de agregados e betume, determinadas em peso dos materiais numa fase intermédia do processo, após aquecimento, são misturadas (faz-se uma amassadura), sendo seguidamente toda a mistura colocada em camiões (ou em silos de armazenamento) e posteriormente

² Citado por Branco *et al.* (2005)

transportada para o local de colocação em obra. Assim, nestas centrais, apenas se inicia a produção de uma nova amassadura quando a anterior estiver pronta (Branco *et al.*, 2005).

A unidade básica de uma central, contínua ou descontínua, é o tambor-secador, pelo qual passam os agregados provenientes dos silos de armazenamento a frio, ocorrendo assim a sua secagem e aquecimento à temperatura necessária para que possam ser envolvidos pelo betume. O tambor-secador consiste num cilindro (1 a 3 metros de diâmetro e 6 a 12 metros de comprimento) ligeiramente inclinado e dotado de um sistema de aquecimento. Os gases quentes libertados pelo sistema de aquecimento deslocam-se assim no interior do cilindro, enquanto os agregados se deslocam por ação da gravidade e do movimento de rotação do cilindro. A passagem dos agregados pelos gases quentes proporciona assim a sua secagem e aquecimento até temperaturas entre os 150 e os 200 °C, dependendo da mistura a produzir.

2.6. Métodos de dimensionamento de pavimentos

Até à segunda década do século XX não era realizado qualquer dimensionamento dos pavimentos rodoviários, adotando-se sempre as mesmas espessuras e materiais. Contudo, com o aumento das cargas atuantes sobre os pavimentos, e com o aparecimento das administrações das infraestruturas rodoviárias, surgiu a necessidade de conhecer o comportamento dos pavimentos e dos seus materiais constituintes, para que cada pavimento fosse ajustado às suas necessidades. Desde 1920, quando se realizou o primeiro grande ensaio rodoviário à escala natural (Yoder e Witczak, 1975), os processos de dimensionamento foram alvo de evoluções constantes.

Nas secções seguintes apresentam-se os principais métodos atualmente utilizados no dimensionamento de pavimentos flexíveis, rígidos e semirrígidos, dando-se especial atenção aos métodos utilizados em Portugal.

2.6.1. Dimensionamento de pavimentos flexíveis

A roda de um veículo ao passar sobre um pavimento, impõe, naquele local, tensões e extensões que vão diminuindo, até se anularem, à medida que a roda se afasta. Dessa forma, o pavimento que se

havia deformado devido à aplicação dessa carga, recupera a sua forma inicial, ficando, contudo, sujeito a uma pequena extensão irrecuperável, dado os seus materiais não serem perfeitamente elásticos. A aplicação sucessiva das cargas, e respetivas extensões, acaba por levar à fadiga dos materiais e provocar a ruína do pavimento.

Também a deformação permanente, isto é, o assentamento do pavimento que é visível à superfície, provocada por cada carregamento, é pequena, mas a aplicação de repetidas cargas, e conseqüente acumulação de deformações, conduz a uma indesejável deformação permanente.

Com base nestes pressupostos, os métodos de dimensionamento empírico-mecanicistas estabelecem expressões que procuram definir os critérios de ruína, ou seja, limitar a fadiga e a deformação permanente a certos níveis, definindo para tal o número de carregamentos (número de eixos-padrão) admissíveis (Branco *et al.*, 2005). De seguida, apresentam-se os principais passos que constituem os métodos de dimensionamento empírico-mecanicista e expeditos de pavimentos flexíveis.

Deve começar por se definir a estrutura do pavimento, tipos e espessuras de camadas, materiais constituintes das misturas, percentagem volumétrica do betume (V_b) e dos agregados (V_a), e volume de vazios no esqueleto do agregado (VMA). É ainda necessário conhecer o tipo de betume utilizado, para determinar a penetração a 25 °C e a temperatura de amolecimento de anel e bola.

Deve também determinar-se tráfego de projeto e, conseqüentemente, o número de eixos-padrão (N_p), que vai solicitar o pavimento durante a vida útil considerada (geralmente admite-se 20 anos para pavimentos flexíveis novos), bem como a temperatura de serviço para o local de dimensionamento.

Procede-se de seguida ao cálculo da rigidez do betume (S_b) através da utilização do ábaco Van der Poel (Van Poel, 1954), ou em alternativa aplicando um conjunto de expressões, apresentadas em Ullidtz e Peattie (1982), mas que só podem ser utilizadas sob determinadas condições.

De seguida define-se o valor do coeficiente de Poisson (em geral considera-se igual a 0,35), e a partir do valor da rigidez do betume, procede-se ao cálculo do módulo de deformabilidade (E_m) das misturas betuminosas. Assim, o método da Shell (Shell, 1978) apresenta um ábaco que permite relacionar o módulo de deformabilidade das misturas betuminosas, com a rigidez do betume (S_b), e com a percentagem volumétrica de betume (V_b) e de agregados (V_a) na mistura betuminosa em análise.

Procede-se depois à definição do coeficiente de Poisson e módulo de deformabilidade da fundação (E_f). Existem algumas expressões para o cálculo do módulo de deformabilidade da fundação que, de forma simplificada, o relacionam com o valor de CBR. De seguida apresenta-se a expressão proposta na Grã-Bretanha (Equação 1), válida para valores de CBR entre 2 e 12%.

$$E_f = 17,6 \times (CBR)^{0,64} \quad (1)$$

Na equação anterior, E_f corresponde ao módulo de deformabilidade da fundação (MPa) e o valor de CBR é utilizado em percentagem.

A partir do módulo de deformabilidade da fundação, determinado no passo anterior, calcula-se o módulo de deformabilidade da sub-base (E_{sb}) através da Equação 2, na qual k é determinado pela Equação 3, sendo h_g a espessura da camada granular sobre o solo de fundação (mm).

$$E_{sb} = k \times E_f \quad (2)$$

$$k = 0,2 \times h_g^{0,45} \quad (3)$$

Claessen *et al.* (1977)³ indicam que o valor de k a adotar deverá ser superior a 1,5, caso contrário a camada de cima não deverá ser realizada por não ser suficientemente mais resistente que a de baixo, e inferior a 4, atendendo a que apenas em condições de execução muito controladas será admissível uma resistência numa camada granular quatro vezes superior à da camada inferior. Caso a sub-base seja constituída por duas ou mais camadas, a Equação 2 pode ser utilizada sucessivamente, isto é, a partir do módulo de deformabilidade da fundação, calcular o módulo de deformabilidade da primeira camada granular e, com este, calcular o da camada seguinte através da mesma expressão.

Também a estas camadas se deve atribuir um valor ao coeficiente de Poisson, considerando-se, geralmente, igual a 0,35 para as camadas de agregado britado de granulometria extensa.

³ Citado por Branco *et al.* (2005)

Depois de caracterizadas as camadas e conhecidas as suas espessuras iniciais a utilizar, num processo que será iterativo, procede-se ao cálculo do estado de tensão-deformação, recorrendo a um programa, como por exemplo o BISAR (Shell, 1998), o ELSYM5 (Kopperman *et al.*, 1986) ou o JPav (Pais, 2014). Desta forma obtém-se as extensões relevantes para o processo de dimensionamento, isto é, a extensão de tração na base das camadas betuminosas (ϵ_t) e a extensão vertical de compressão no topo da fundação (ϵ_{dp}), locais onde se controla a ruína do pavimento através dos critérios de fadiga e de deformação permanente.

A partir do estado de tensão-deformação (determinado no passo anterior), procede-se ao cálculo do número de eixos padrão admissíveis para esse pavimento, no período de vida considerado, atendendo a esses critérios de fadiga e de deformação permanente. O critério de ruína a considerar (critério determinante) será aquele que conduza a um menor número de eixos padrão admissíveis (N_{80}).

A fadiga nos pavimentos rodoviários flexíveis tem como consequência um fendilhamento excessivo que se inicia na zona mais tracionada das camadas ligadas, isto é, na base das camadas betuminosas, e que é controlado pela extensão radial de tração (ϵ_t).

A caracterização do comportamento à fadiga das camadas do pavimento pode ser efetuada através de ensaios que traduzam um comportamento próximo do real, podendo para tal recorrer-se a ensaios acelerados à escala real em pista de ensaios ou a ensaios de laboratório (de flexão e de tração indireta ambos com carregamento repetido). Em alternativa, os métodos de dimensionamento apresentam expressões que conduzem à determinação da extensão radial de tração, de forma a estabelecer a resistência à fadiga. Apresenta-se de seguida a Equação 4, considerada no método da Shell para estabelecer a relação entre a extensão radial de tração e a vida útil à fadiga do pavimento (Shell, 1978). O método da Shell é aqui apresentado por ser o utilizado posteriormente na parte prática deste trabalho.

$$\epsilon_t = (0,856 \cdot V_b + 1,08) \cdot E_m^{-0,36} \cdot N_{80}^{-0,2} \quad (4)$$

Na equação anterior, ϵ_t corresponde à extensão de tração, N_{80} ao número de eixos padrão de 80 kN, V_b à percentagem volumétrica de betume no volume total e E_m ao módulo de deformabilidade da mistura betuminosa (Pa).

A deformação permanente consiste num assentamento excessivo à superfície do pavimento, controlado pela extensão vertical de compressão (ε_{dp}) no topo do solo de fundação.

À semelhança da resistência à fadiga, apresenta-se de seguida a Equação 5 utilizada pelo método da Shell para estabelecer a relação entre a extensão vertical de compressão no topo do solo da fundação (ε_{dp}) e a vida útil (N_{80}) do pavimento.

$$\varepsilon_{dp} = K_s \cdot N_{80}^{-0.25} \quad (5)$$

Na equação anterior, ε_{dp} corresponde à extensão vertical de compressão no topo do solo de fundação, N_{80} ao número de eixos padrão de 80 kN e K_s é um parâmetro que depende da probabilidade de sobrevivência atribuída no âmbito do dimensionamento do pavimento, tomando o valor de $2,8 \times 10^{-2}$ para 50% de probabilidade de sobrevivência, $2,1 \times 10^{-2}$ para 85% e $1,8 \times 10^{-2}$ para 95%.

Finalmente, a partir do número de eixos padrão que previsivelmente solicitarão o pavimento durante a sua vida útil (N_p), e do número de eixos padrão admissíveis (N_{80}), pode obter-se a percentagem de resistência que já está gasta, ou seja, o dano (D), através da Equação 6.

$$D = \frac{N_p}{N_{80}} \times 100 \quad (6)$$

Caso D seja superior a 100% ou inferior a 80% haverá, respetivamente, subdimensionamento ou sobredimensionamento do pavimento. Em qualquer destes casos haverá que voltar ao passo inicial, alterando a espessura das camadas, o tipo de materiais ou o tipo de pavimento, e repetindo os passos seguintes até se chegar a um dimensionamento conveniente ao fim dum processo iterativo.

Em alternativa aos métodos empírico-mecanicistas, existem diversos métodos que permitem obter esse dimensionamento de forma simples, podendo referir-se, a título de exemplo, o procedimento espanhol (DGC, 2002), o francês (LCPC, 1998), o inglês (HA, 2006) e o português designado de MACOPAV (JAE, 1995). No MACOPAV, as estruturas dos pavimentos são definidas em função da Classe de Tráfego (que varia de T1 a T6) e da Classe de Fundação (que varia de F1 a F4), utilizando-se para tal os quadros definidos por aquele manual, os quais consideram diferentes estruturas e diferentes tipos de pavimentos.

2.6.2. Dimensionamento de pavimentos rígidos

À semelhança dos pavimentos flexíveis, o dimensionamento dos pavimentos rígidos tem como objetivo a prevenção das principais formas de degradação, as quais comprometem o seu bom desempenho. No caso dos pavimentos rígidos, as principais formas de degradação incluem o fendilhamento por fadiga, a bombagem de finos, as irregularidades superficiais, deterioração e escalonamento das juntas para pavimentos de betão vibrado formado por lajes separadas por juntas, ou a perda de material na superfície da laje dum pavimento de betão armado contínuo (Branco *et al.*, 2005).

Um dos principais métodos de dimensionamento de pavimentos rígidos, sendo provavelmente o mais conhecido e utilizado em todo o mundo, é o método da PCA - *Portland Cement Association* (PCA, 1984). Os critérios de dimensionamento considerados são a fadiga e a erosão. A fadiga consiste na rotura do pavimento devido a um fendilhamento excessivo provocado pela repetição das cargas e a erosão contempla a ocorrência de outras deficiências do pavimento devido a perda ou deslocação de material erodido na camada de apoio das lajes. A erosão resulta da ação da água e do tráfego, conjugada com a perda de impermeabilização das juntas, e leva à perda de finos através das juntas (bombagem), acumulação de finos sob uma das lajes contíguas a uma junta provocando o seu desnivelamento (escalonamento) e, eventualmente, falta de apoio no bordo longitudinal das lajes junto às bermas.

Apesar do investimento inicial ser maior nos pavimentos rígidos, o seu período de vida útil considerado é, no mínimo, de 30 anos, podendo chegar aos 40 anos, potenciando esse investimento. O tráfego deve ser estimado por tipo de eixo (simplex, tandem ou duplo e triplo) para a vida útil do pavimento.

Tal como os pavimentos flexíveis, os pavimentos rígidos podem também ser dimensionados através de métodos mais expeditos, nomeadamente utilizando o manual do MACOPAV (JAE, 1995).

2.6.3. Dimensionamento de pavimentos semirrígidos

O dimensionamento de pavimentos semirrígidos é semelhante ao dos pavimentos flexíveis, podendo-se, na generalidade, seguir o respetivo processo anteriormente descrito. Existem, contudo, algumas especificidades deste tipo de pavimentos que importa referir. Sendo estes pavimentos dotados de uma

camada de base rígida (betão pobre cilindrado ou vibrado fabricado em central), as tensões transmitidas às camadas inferiores são muito atenuadas. Desta forma, para o dimensionamento deste tipo de pavimentos, não se considera a deformação permanente como um critério de ruína (Branco *et al.*, 2005).

Por outro lado, a referida camada de base rígida em betão pobre acaba por fendilhar, por retração termo-higrométrica, provocando tensões de tração nas imediações das fendas por ação do tráfego e das variações de temperatura, conduzindo à sua propagação para as camadas betuminosas. De forma a obviar este inconveniente, o dimensionamento destes pavimentos deve passar pela prévia determinação do estado de tensão e deformação nessas zonas (através do método de elementos finitos, por exemplo) e posterior dimensionamento das camadas betuminosas subjacentes de modo a suportarem esse fendilhamento durante a vida útil do pavimento. De modo a reduzir as elevadas espessuras das camadas betuminosas, normalmente obtidas nestas situações, recorre-se habitualmente a mecanismos de retardamento ou eliminação da transmissão de fendilhamento. São exemplos disso a utilização de geotêxteis embebidos em betume ou geogrelhas, a utilização de outros tipos de misturas betuminosas (por exemplo, argamassas betuminosas ricas em betume modificado com elastómeros ou misturas abertas com baixo teor em betume), ou o recurso a outras estruturas, como o pavimento semirrígido inverso (Branco *et al.*, 2005).

À semelhança dos pavimentos anteriores (flexíveis e rígidos), também os pavimentos semirrígidos podem ser dimensionados através de métodos expeditos, nos quais se inclui o MACOPAV (JAE, 1995).

2.7. Técnicas de construção e reabilitação de pavimentos rodoviários flexíveis

Na presente secção expõe-se resumidamente as operações relacionadas com a construção (colocação em obra das misturas betuminosas) e reabilitação dos pavimentos rodoviários flexíveis.

2.7.1. Colocação em obra de misturas betuminosas

A colocação em obra de misturas betuminosas compreende as seguintes operações:

- Preparação da superfície sobre a qual será colocada a mistura;

- Transporte da mistura para o local de aplicação;
- Espalhamento da mistura;
- Compactação da mistura.

A preparação da superfície tem como objetivo a verificação da regularidade da superfície (desempenho), bem como a sua limpeza de forma a garantir-se a não existência de material solto. Nesta operação devem ainda incluir-se as regas de impregnação e de colagem necessárias. Assim, sobre a última camada granular é habitual proceder-se à aplicação de uma rega de impregnação, a qual protegerá esta camada das ações climáticas (chuva) e do tráfego da obra. As regas de colagem são aplicadas sobre as camadas betuminosas, antes de lhes ser sobreposta outra camada betuminosa, e por vezes sobre a rega de impregnação, antes da aplicação da primeira camada betuminosa. Esta rega, como o seu nome indica, pretende garantir a colagem das várias camadas, evitando o deslizamento de umas sobre as outras e consequente rotura prematura do pavimento (Branco *et al.*, 2005).

O transporte da mistura para o local de aplicação é realizado em camiões basculantes, que a descarregam diretamente na misturadora. Esta operação, apesar de simples, exige alguns cuidados, nomeadamente, a pintura da caixa de transporte com água e sabão para evitar que a mistura adira a esta superfície, a cobertura desta com lonas apropriadas de forma a reduzirem-se as perdas de temperatura e, durante o carregamento do camião deverá evitar-se a segregação do material (separação dos materiais finos e grossos) reduzindo a altura de queda deste e movendo-se o camião para evitar a formação de apenas um monte cónico de mistura.

O espalhamento da mistura é efetuado por pavimentadoras. A mistura, depois de descarregada pelos camiões no silo recetor, é transportada por cintas e distribuída por toda a largura da pavimentadora através de um sem-fim helicoidal, passando depois sob a mesa vibradora que a pré-acondiciona em toda a largura de espalhamento. As pavimentadoras são ainda dotadas de sensores eletrónicos que, operando com um perfil de referência de um dos lados e um sensor de inclinação do outro, permitem à mesa vibradora controlar a espessura de colocação.

Por último, a compactação tem por objetivo dotar a mistura da densidade pré-estabelecida. Para tal, são normalmente utilizados cilindros de pneus e cilindros de rolos de rasto liso. Habitualmente começa-se a compactação com o cilindro de rolos a vibrar, introduzindo-se de seguida o cilindro de

pneus com pressão elevada e passando novamente o cilindro de rolos sem vibrar para regularizar eventuais vincos deixados pelo cilindro de pneus. No entanto, quando a espessura a compactar é relativamente alta, pode utilizar-se o trem ao contrário (Branco *et al.*, 2005).

2.7.2. Técnicas de reabilitação de pavimentos rodoviários

As técnicas de reabilitação de um pavimento podem considerar o seu reforço estrutural, o qual pode ser conseguido com a colocação de uma ou mais camadas betuminosas sobre o pavimento existente. Contudo, a simples adição de novas camadas ao pavimento acarreta vários problemas, nomeadamente, em relação à altura útil (*gabari*) em túneis ou sob viadutos, problemas de drenagem e formação de degraus nas bermas, obrigando ainda à subida das tampas das caixas de visita que se situem ao longo da estrada, bem como à necessidade de proceder a ajustamentos nas cotas de acesso às propriedades marginais e ao levantamento de guardas de proteção.

Assim, outra possibilidade de reabilitação dos pavimentos flexíveis consiste na fresagem das áreas localizadas muito degradadas, substituindo-as por misturas betuminosas novas, com aplicação posterior de uma ou mais camadas betuminosas a toda a largura do pavimento existente já reparado nesses locais críticos. Este processo pode ainda incluir a aplicação de uma interface retardadora do processo de propagação de fendas do pavimento degradado para as novas camadas. Podem ainda adotar-se técnicas mais conservativas para retardar e/ou minimizar as intervenções de maior dimensão. São exemplo disso a selagem de fendas, que impedirá a entrada de água no pavimento, a qual precipitará a sua degradação, ou a melhoria das características superficiais.

Quando os pavimentos atingem um nível de degradação demasiado elevado, torna-se necessária a sua demolição, a qual resulta na produção de resíduos. Ao transportá-los a vazadouro, estar-se-á a esquecer a componente ecológica, desvalorizando os seus impactes. Chiu *et al.* (2008) apelidam os resíduos de "recursos nos lugares errados" defendendo a sua reutilização ou reciclagem. Nesse sentido, surge a opção de reciclar o pavimento existente, reaproveitando os materiais do pavimento e melhorando a sua capacidade de suporte.

Pela importância que a reciclagem de pavimentos pode apresentar como técnica de reabilitação mais sustentável (Araújo *et al.*, 2012), e por se enquadrar de forma especial no âmbito deste trabalho,

nomeadamente nos cenários de reabilitação e conservação considerados no Capítulo 8 e que previam, sempre que possível, o recurso à reciclagem, em seguida será feita uma descrição mais pormenorizada das diferentes formas de proceder à reabilitação de pavimentos com esta técnica.

2.8. Reciclagem de pavimentos rodoviários

De uma forma geral, as técnicas de reciclagem de pavimentos podem classificar-se em dois tipos, sendo elas as técnicas de reciclagem a quente e a frio, que por sua vez podem ser processadas no próprio local, ou seja, *in situ*, ou em central.

2.8.1. Técnicas de reciclagem a quente

A reciclagem a quente de pavimentos é um processo em que parte ou todo o material betuminoso é removido e reduzido a dimensões apropriadas para depois ser misturado a quente no próprio local ou em central. O processo pode incluir a adição de novos agregados, betume e agentes rejuvenescedores. O produto final deve atender às especificações de misturas betuminosas a quente destinadas às camadas de base, de regularização ou de desgaste (DNER, 1998).

2.8.1.1. Reciclagem a quente, em central

O fabrico de misturas betuminosas recicladas a quente em central compreende a utilização de agregados e betume novos, juntamente com os materiais resultantes da fresagem de pavimentos antigos. Estas misturas são produzidas no mesmo tipo de centrais utilizadas para o fabrico das misturas betuminosas convencionais, embora sujeitas a algumas modificações em função do tipo de central (contínua ou descontínua) e da percentagem de materiais fresados a incorporar na mistura.

A percentagem de material reciclado a incorporar em determinada mistura prende-se, em grande parte, com o processo adotado para o aquecimento do material a reciclar, constituído por agregados e betume, o qual requer cuidados especiais durante o seu aquecimento, em particular no que respeita à temperatura empregue, não devendo exceder determinados valores por forma a não se proporcionar ainda mais o envelhecimento de um betume já por si envelhecido (Batista, 2004).

No caso das centrais betuminosas descontínuas, as percentagens usuais de material a reciclar situam-se entre 30 e 70%, enquanto as centrais contínuas permitem taxas de reciclagem até cerca de 50% (EAPA, 1998). Embora não sejam utilizadas de forma tão genérica, já existem contudo, centrais tecnologicamente mais avançadas que permitem a utilização de 100% do material reciclado, requerendo apenas a utilização de pequenas quantidades de novos materiais (Silva *et al.*, 2012).

Geralmente, nas centrais contínuas, as misturas betuminosas a reciclar, após processamento, são introduzidas na zona central do tambor secador-misturador, onde estão protegidas da chama do queimador, sendo o aquecimento das misturas betuminosas fresadas feito, neste caso, pelos gases de combustão quentes e pelo contacto com os novos agregados sobreaquecidos (Batista, 2004).

2.8.1.2. Reciclagem a quente *in situ*

A reciclagem a quente *in situ*, inicia-se com o aquecimento do pavimento existente, o que facilita o processo de escarificação ou fresagem, após o qual se mistura o material fresado daí resultante com outros materiais, nomeadamente agregados e betume “novos”, sendo depois a mistura resultante espalhada e compactada de acordo com as técnicas normalmente utilizadas na construção de camadas em misturas betuminosas convencionais (Figura 2).



Figura 2 – Central móvel para reciclagem de pavimentos flexíveis a quente *in situ* (Wirtgen, 2016b)

A quantidade de agregados virgens que podem ser adicionados ao material reciclado está limitada pela capacidade dos equipamentos existentes, sendo geralmente inferior a 30% em massa (ARRA, 2001).

Devido, por um lado, à complexidade dos equipamentos utilizados para a reciclagem a quente *in situ*, e por outro lado, ao facto de durante o fabrico das misturas serem emitidas substâncias para a atmosfera (resultantes do aquecimento dos materiais), este tipo de solução pode conduzir a impactos sociais e ambientais consideráveis, para além de constituir um investimento financeiro importante, sendo, em Portugal, apenas conhecida uma experiência com esta técnica (Batista, 2004).

2.8.2. Técnicas de reciclagem a frio

Quando a reciclagem dos materiais rodoviários ocorre sem o dispêndio de energia para o seu aquecimento, esta técnica designa-se de reciclagem a frio, podendo nesse caso ser utilizado um ligante betuminoso (emulsão ou espuma de betume) ou um ligante hidráulico (cimento ou cal hidráulica).

2.8.2.1. Reciclagem a frio em central

A reciclagem a frio, em central, é normalmente realizada com emulsão betuminosa, após a fresagem das camadas do pavimento existente. Obriga ao transporte do material resultante para central (Figura 3) onde é misturado com a emulsão betuminosa à temperatura ambiente, seguindo-se o seu transporte e aplicação na obra de proveniência ou noutra (Baptista, 2006).



Figura 3 – Central móvel para a produção de misturas recicladas a frio (Wirtgen, 2016a)

A técnica de reciclagem a frio, em central, com espuma de betume, processa-se de forma semelhante à técnica anterior, diferindo apenas no tipo de ligante. Neste caso, em vez de emulsão betuminosa, é utilizada espuma de betume, que tem a vantagem de utilizar uma quantidade muito menor de água em comparação com as emulsões.

A espuma de betume é obtida aquecendo o betume entre 160 e 180 °C e injetando, na câmara de expansão, uma quantidade controlada de ar e água fria, normalmente 2 a 4% em massa (Wirtgen, 2012), o que faz com que o betume se expanda. De acordo com Oliveira *et al.* (2014), para percentagens de água da ordem de 4%, o betume expande para cerca de 25 vezes o seu volume inicial. Isso permite realizar o envolvimento dos agregados à temperatura ambiente.

2.8.2.2. Reciclagem a frio *in situ*

A reciclagem a frio *in situ* com cimento é especialmente indicada para pavimentos que apresentem uma forte insuficiência estrutural, utilizando-se equipamentos que, numa só operação, fresem, incorporem cimento e água, misturem o material fresado e o espalhem (Batista, 2009).

Da mistura do material fresado com o ligante resulta uma nova camada granular tratada com cimento, do tipo *agregado de granulometria extensa tratado com cimento* (AGEC), a qual apresentará uma resistência bastante mais elevada comparativamente a outras soluções (Branco *et al.*, 2005). No entanto, o pavimento que inicialmente era do tipo flexível passa a ser do tipo semirrígido, verificando-se que a camada reciclada apresentará propensão para a retração, conforme referido anteriormente. Nesse sentido, este tipo de solução obriga, por regra, à aplicação de camadas superiores realizadas com misturas betuminosas a quente (Oliveira *et al.*, 2007).

A reciclagem a frio *in situ* com emulsão betuminosa apenas difere do processo anterior quanto ao ligante utilizado. A utilização de ligante diferente em relação ao da técnica anterior vai determinar algumas alterações, nomeadamente quanto aos meios necessários à sua execução, à exigência de determinadas condições meteorológicas, onde deve predominar o tempo seco para permitir a rotura da emulsão, e quanto às características do pavimento (Batista, 2009).

Na reciclagem a frio com emulsão betuminosa é muitas vezes adicionado cimento e/ou cal, em percentagens da ordem de 1 a 2%, de modo a facilitar ou acelerar a rotura da emulsão, reduzir a sensibilidade à água, especialmente com materiais argilosos ou contaminados, corrigir a granulometria, ou aumentar a coesão do material resultante, sendo normalmente este tipo de reciclagem (que emprega ligantes betuminosos e hidráulicos) designado por reciclagem mista a frio (InIR, 2009b).

Mesmo sendo a reciclagem *in situ* a frio complementada quase sempre por um reforço de misturas betuminosas a quente, cuja espessura mínima normal é de 5 a 6 cm, consoante o tipo e volume de tráfego, esta técnica supõe sempre uma economia de materiais, relativamente à solução convencional de fresagem e transporte do material resultante a vazadouro (InIR, 2009b).

A reciclagem a frio, *in situ*, com espuma de betume, compreende a mistura do material proveniente da fresagem do pavimento existente com espuma de betume, num equipamento semelhante ao utilizado para a reciclagem a frio com emulsão, conforme se pode observar na Figura 4. A espuma de betume apresenta uma menor viscosidade comparativamente com o betume, facilitando desta forma o envolvimento dos agregados. Por outro lado, o facto de se utilizar quantidades muito menores de água em comparação com a emulsão betuminosa permite controlar mais facilmente o teor de humidade e reduzir a sensibilidade durante a construção (Overby *et al.*, 2004).



Figura 4 – Equipamento utilizado para reciclagem a frio *in situ* com ligantes betuminosos (Wirtgen, 2012)

Apesar de ser necessário o aquecimento do betume, este tipo de reciclagem não é considerada uma técnica a quente, uma vez que a mistura dos componentes (espuma de betume, material fresado e eventualmente aditivos), a colocação, e compactação da mistura são efetuadas à temperatura ambiente (Cunha, 2010).

De referir, por fim, que as técnicas de reciclagem *in situ* a frio, apresentam algumas vantagens comuns, nomeadamente, a possibilidade de se utilizar a totalidade do material fresado e o facto de se evitar o transporte para a central, o que, além dos custos económicos, permite reduzir impactes ambientais como o consumo de energia (combustível) e as emissões libertadas para a atmosfera.

2.8.3. Reciclagem semi-quente em central

A reciclagem semi-quente em central compreende o aquecimento do material fresado a temperaturas da ordem dos 80 a 90 °C, ao qual se adiciona posteriormente uma emulsão betuminosa modificada, capaz de resistir à deterioração causada pela elevada temperatura.

A mistura reciclada pode ser armazenada durante 24 horas, desde que o espalhamento e compactação sejam efetuados a uma temperatura mínima de 60 °C. Este tipo de mistura permite a abertura imediata ao tráfego, dado ser fabricada a uma temperatura superior à temperatura ambiente, possuindo assim um menor tempo de cura quando comparado com o de uma mistura fabricada a frio (temperatura ambiente) com uma emulsão betuminosa convencional (Batista, 2004).

Esta técnica de reciclagem permite a incorporação de quase 100% do material fresado, podendo as misturas ser produzidas no mesmo tipo de centrais anteriormente apresentadas (contínuas ou descontínuas). Para tal, o material fresado será aquecido no tambor secador, sendo posteriormente misturado com a emulsão betuminosa modificada, no misturador da central, caso se trate de uma central descontínua, ou no tambor secador-misturador, caso se trate de uma central contínua (Sánchez (2006); Dinis-Almeida *et al.* (2012)).

CAPÍTULO 3

SUSTENTABILIDADE DOS PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS

3.1. Conceito de sustentabilidade

São várias as definições aceites para “sustentabilidade”, fruto da evolução que este conceito tem sofrido nos últimos anos mas, sobretudo, da grande abrangência que se lhe reconhece. Uma das principais definições, e provavelmente a que melhor tem sido aceite pela sociedade, surgiu em 1987 no documento “*Our Common Future*” (WCED, 1987), vulgarmente conhecido por “Relatório Brundtland”, o qual colocou na ordem do dia as questões ambientais e, mais especificamente, o desenvolvimento sustentável, que definiu como o “desenvolvimento que satisfaz as necessidades presentes, sem comprometer a capacidade das gerações futuras satisfazerem as suas próprias necessidades”.

Com o tempo foram surgindo outras definições para o conceito de desenvolvimento sustentável, embora, na generalidade, não variem muito e derivem, no essencial, da definição anteriormente apresentada. Em 1991, a *International Union for Conservation of Nature* definiu desenvolvimento sustentável como “a melhoria da qualidade de vida humana, assegurando a necessária capacidade de suporte e apoio aos ecossistemas” (CIB, 1999).

Em 1994, realizou-se a Primeira Conferência Mundial sobre Construção Sustentável (*First World Conference for Sustainable Construction*), em Tampa, Florida, tendo a construção sustentável sido definida como “a criação e a gestão responsável de um ambiente construído e a construir, saudável, de

acordo com os princípios ecológicos e a utilização eficiente dos recursos” (Kibert, 1994).

Em 1996, o plano da “Agenda 21 Local” definiu desenvolvimento sustentável como “o desenvolvimento que providencia serviços básicos ao nível ambiental, social e económico para todos os elementos de uma comunidade sem ameaçar a viabilidade de sistemas naturais, sociais e de construção sobre os quais o fornecimento desses sistemas depende” (ICLEI, 1996).

No mesmo ano, a *American Society of Civil Engineers* definiu desenvolvimento sustentável como “o desafio de satisfazer as necessidades humanas em termos de recursos naturais, produtos industriais, energia, alimentos, transporte, abrigo e gestão eficiente de resíduos, conservando e protegendo a qualidade ambiental e a base dos recursos naturais essenciais para o desenvolvimento futuro” (ASCE, 2008).

As definições acima apresentadas são apenas algumas das várias que têm surgido para descrever o desenvolvimento sustentável. Fica assim evidente tratar-se de um conceito que vai permanecendo “em aberto”, sendo alvo de diferentes definições por várias organizações ao longo do tempo, adaptando-se aos contextos sociais, políticos e económicos que paralelamente têm vindo a evoluir. Trata-se, portanto, de um conceito que se reorganiza e reformula em função da evolução das sociedades, tendo como pilares o ambiente, a sociedade e a economia (Figura 5).

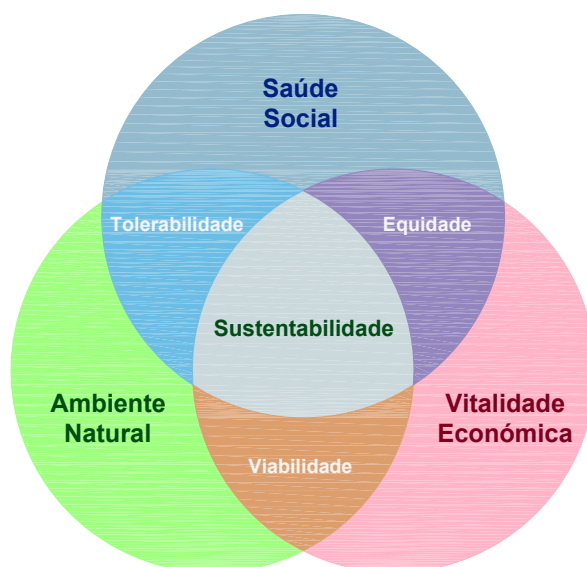


Figura 5 – Representação gráfica dos três pilares da sustentabilidade (adaptado de Wathne (2010))

Se inicialmente a vertente ambiental deste processo se limitava aos fenómenos imediatos e com grande visibilidade, com o passar do tempo foi-se percebendo a importância de fatores como o consumo de energia ou a quantidade de emissões poluentes para a atmosfera. Atualmente o termo “sustentabilidade” é aplicado de forma ampla a quase todos os aspetos, embora seja cada vez mais utilizado num contexto de sustentabilidade humana na Terra, com especial enfoque nas causas do aquecimento global e das mudanças climáticas (Wathne, 2010).

3.2. Conceito de Ciclo de Vida

3.2.1. Enquadramento

A avaliação do ciclo de vida é uma técnica que tem merecido uma crescente atenção nos últimos anos, em particular desde 1990, tendo os primeiros estudos que se assemelharam a avaliações do ciclo de vida sido elaborados na década de 70, motivados pela crise petrolífera, pelo que constituíram essencialmente estudos energéticos (Ferrão, 1998). De acordo com Francisco (2008), o primeiro estudo do género, que acabaria por se tornar num modelo das análises do ciclo de vida, terá sido solicitado pela Coca-Cola ao MRI (*Midwest Research Institute*), o qual viria a ser aperfeiçoado em 1974 pelo mesmo instituto, a pedido da EPA (*Environmental Protection Agency*).

Com o desvanecimento da crise petrolífera, depois de 1975, o interesse por este tipo de estudo diminuiu (Ferrão, 1998).

Este procedimento foi sendo utilizado sobretudo pelas grandes empresas de fabrico de bens de consumo, as quais pretendiam, com as análises do ciclo de vida, demonstrar a superioridade dos seus produtos face aos concorrentes na vertente ambiental (Ferrão, 1998). Inicialmente as análises incidiam no consumo de energia e matérias-primas e na determinação dos resíduos provenientes da fabricação dos respetivos produtos, tornando-se com o tempo mais diversificadas e abrangentes, sendo o seu carácter multidisciplinar, atualmente indiscutível.

Por volta de 1985 começaram a ser utilizadas para a análise e seleção de pavimentos na Pensilvânia (Francisco, 2008), tendo-se generalizado e constituindo atualmente um instrumento imprescindível na tomada de decisões relativas aos pavimentos rodoviários.

3.2.2. Ciclo de vida dos pavimentos rodoviários

Qualquer projeto de construção, nomeadamente de pavimentos rodoviários, apresenta um impacto significativo sobre o ambiente. Da atividade inerente à própria construção, resulta um impacto direto consequente do consumo de energia e recursos naturais bem como da libertação de emissões gasosas para a atmosfera, no entanto, os seus efeitos continuam a fazer-se sentir durante toda a fase de operação da infraestrutura, aumentando nos períodos em que decorram as operações de conservação, renovação e demolição.

A fase de utilização da estrada, e os impactes daí decorrentes não devem, portanto, ser descurados. Em 2013 o transporte rodoviário foi responsável por 23% das emissões de CO₂ nos 28 países da União Europeia (EEA, 2015). A sua redução depende, por um lado, do tipo e das características do pavimento e, por outro lado, do comportamento dos condutores, os quais podem praticar a chamada eco-condução. A eco-condução corresponde a um conjunto de comportamentos que os condutores podem adotar de forma a economizar combustível e reduzir as emissões gasosas libertadas (Mensing *et al.*, 2014). Hof *et al.* (2014) enumera algumas dessas práticas, umas num sentido mais vasto, relativas aos veículos e sua manutenção, como a verificação da pressão dos pneus, e outras mais específicas da condução, tais como manter uma velocidade constante, evitar travagens e acelerações desnecessárias e, sempre que possível, antecipando situações de trânsito. De acordo com Barkenbus (2010), a adoção da eco-condução poderá permitir uma diminuição do consumo de combustível e, consequentemente, das emissões de CO₂ resultantes da combustão do combustível nos motores convencionais entre 5 e 10%.

Tradicionalmente, as Avaliações do Ciclo de Vida costumam focar-se nos impactes ambientais, regionais e globais, sobre o meio ambiente, incidindo sobretudo nas emissões para a atmosfera, nas descargas na água, e na geração de resíduos sólidos. No que respeita às emissões para a atmosfera, existem preocupações acrescidas com o CO₂, CH₄ e N₂O devido ao seu potencial para o efeito de estufa, responsável pelas alterações climáticas que se verificam na atualidade.

O objetivo fundamental de qualquer metodologia de análise do ciclo de vida consiste em avaliar um produto ou serviço ao longo da sua vida, considerando os impactes diretos e indiretos. Apesar deste conceito parecer simples, a sua aplicação torna-se mais complicada devido à falta de compreensão do

sistema em estudo e à dificuldade de obtenção de dados relevantes. Isso conduz a uma visão bastante limitada sobre o ciclo de vida, levando a que, no caso dos pavimentos, se considere normalmente apenas as atividades de extração, produção, transporte e aplicação dos materiais (Santero *et al.*, 2011b).

De acordo com a bibliografia (Santero *et al.* (2011b); Yu e Lu (2012)), o ciclo de vida de um pavimento está dividido em cinco fases: (1) matérias-primas e produção; (2) construção; (3) uso; (4) conservação; (5) fim de vida. Cada fase é composta por vários componentes, cada um representando uma interação única entre as estradas e o meio ambiente.

As avaliações do ciclo de vida assumem assim uma importância extrema nas tomadas de decisões, sendo consideradas por Häkkinen (1994)⁴ como a única base legítima para comparar materiais, componentes e serviços alternativos.

É, portanto, inquestionável a sua utilidade para a quantificação dos potenciais impactes ambientais associados ao ciclo de vida de um sistema, produto ou serviço. Essa avaliação, essencialmente quantitativa, permite identificar a energia e os materiais consumidos bem como os resíduos libertados para o meio ambiente (Figura 6).

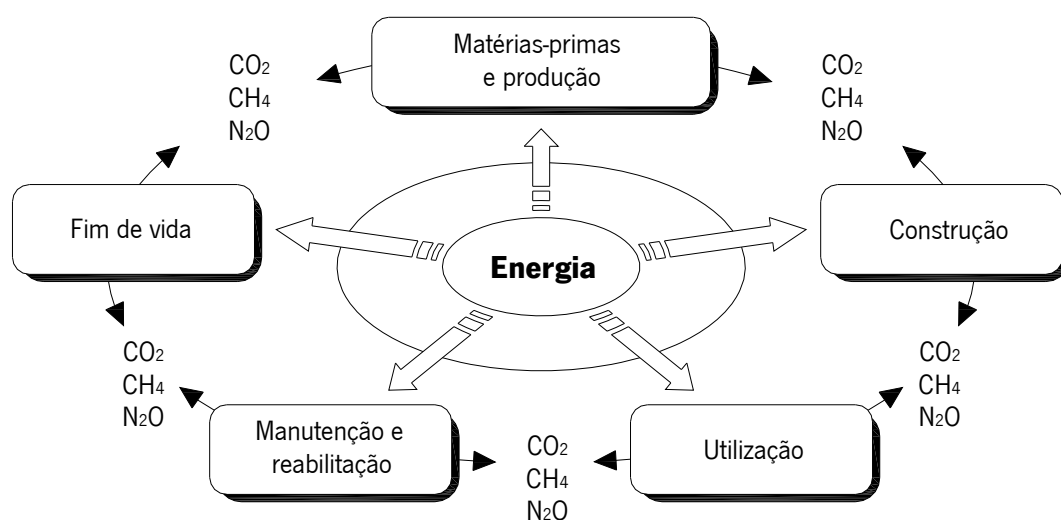


Figura 6 – Fases do ciclo de vida dos pavimentos e interação com o ambiente (adaptado de Park *et al.*, 2003)

⁴ Citado por Treloar *et al.* (2004)

Nesse sentido, Nathman (2008) frisa o potencial deste método na implementação de medidas que possibilitem um melhoramento do desempenho ambiental dos produtos em vários pontos do seu ciclo de vida.

O projeto europeu “*Energy Conservation in Road Pavement Design, Maintenance and Utilisation*” concluiu que a avaliação das implicações energéticas durante a fase de projeto de uma estrada permitirá reduzir o consumo de energia das atividades de construção, utilização e conservação em 47, 20 e 30%, respetivamente (ECRPD, 2010).

3.2.3. Normalização das Avaliações do Ciclo de Vida

No que respeita à normalização da avaliação do ciclo de vida, a ISO – *International Organization for Standardization* – atribuiu-lhe a família 14040, tendo publicado várias normas que foram sendo revistas/substituídas ao longo do tempo, encontrando-se as seguintes atualmente em vigor:

- ISO 14040 (2006): *Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework* (resultante da revisão das Normas ISO 14040 (1997), ISO 14041 (1998), ISO 14042 (2000) e ISO 14043 (2000));
- ISO 14044 (2006): *Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines*.

Para além da definição das normas apresentadas, a ISO têm publicado também Relatórios Técnicos (TR – *Technical Report*) e Especificações Técnicas (TS – *Technical Specification*) que, à semelhança das normas, têm sido alvo de revisões, encontrando-se atualmente em vigor os seguintes:

- ISO/TS 14048 (2002): *Environmental management – Life cycle assessment – Data documentation format*;
- ISO/TR 14047 (2012): *Environmental management – Life cycle assessment – Illustrative examples on how to apply ISO 14044 to impact assessment situations*;
- ISO/TR 14049 (2012): *Environmental management – Life cycle assessment – Illustrative examples on how to apply ISO 14044 to goal and scope definition and inventory analysis*;

- ISO/TS 14067 (2013): *Greenhouse gases - Carbon footprint of products - Requirements and guidelines for quantification and communication;*
- ISO/TS 14071 (2014): *Life cycle assessment – Critical review processes and reviewer competencies – Additional requirements and guidelines to ISO 14044:2006;*
- ISO/TS 14072 (2014): *Life cycle assessment – Requirements and guidelines for organizational life cycle assessment.*

3.3. Processo de Avaliação do Ciclo de Vida

A Avaliação do Ciclo de Vida começa com uma definição do objetivo e âmbito do estudo. O trabalho principal consiste no desenvolvimento de um inventário em que todos os encargos ambientais significativos, durante o tempo de vida do produto ou processo, serão quantificados e compilados, ao que se seguirá uma avaliação dos impactes, sendo apresentados de forma a permitir a sua comparação ou análise mais profunda (Huang *et al.*, 2009b).

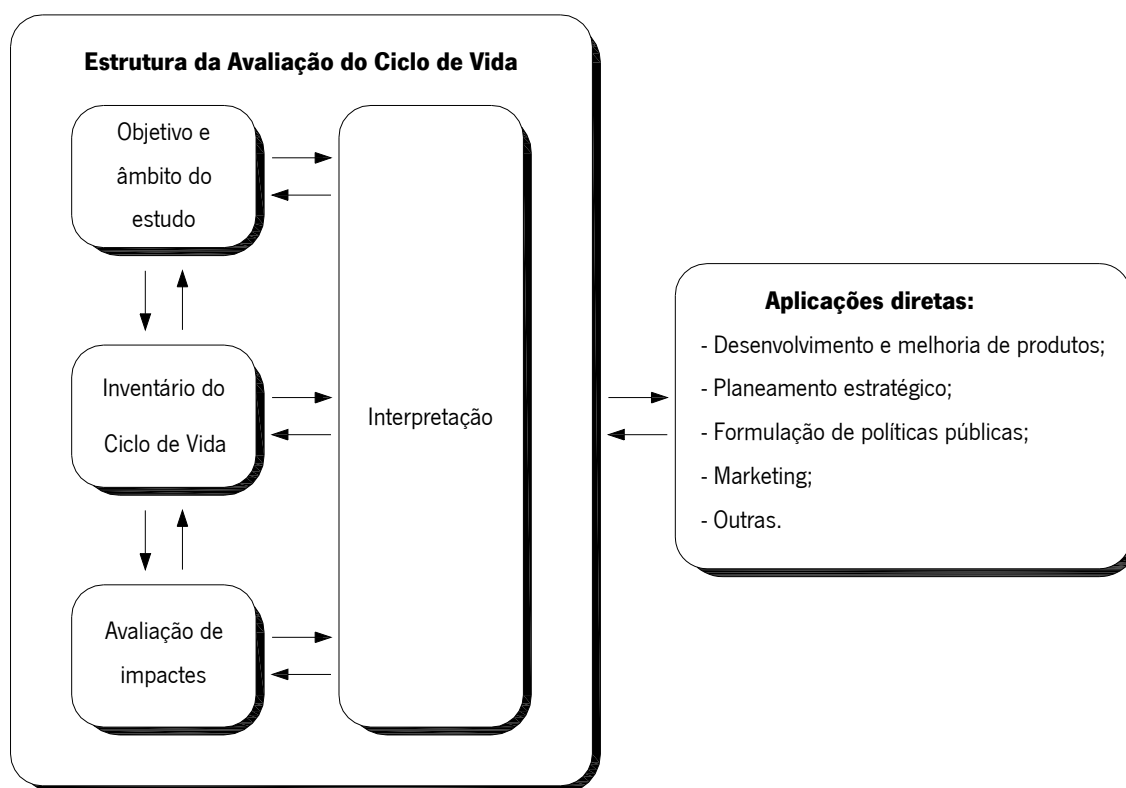


Figura 7 – Fases e aplicações de uma Avaliação do Ciclo de Vida (adaptado de ISO 14040 (2006))

A Norma ISO 14040 (2006) divide os processos de Avaliação do Ciclo de Vida em 4 fases: (1) Definição do objetivo e âmbito do estudo; (2) Inventário do Ciclo de Vida; (3) Avaliação de impactos; (4) Interpretação. Na Figura 7 apresentam-se as relações entre essas fases, bem como as aplicações diretas resultantes das Avaliações do Ciclo de Vida.

3.3.1. Objetivo e âmbito do estudo

A primeira etapa de um processo de Avaliação do Ciclo de Vida passa pela definição do objetivo do estudo, devendo também ser abordadas as escolhas e limitações do sistema e da metodologia a adotar. Sem com isto menosprezar as etapas seguintes, esta reveste-se de particular importância, na medida em que definirá o estudo a realizar e as suas especificidades.

A Norma ISO 14040 (2006) refere que o objetivo deve expor: a aplicação pretendida, as razões para a realização do estudo e a audiência pretendida, ou seja, a quem irão ser comunicados os resultados, bem como se estes se destinam a ser utilizados em asserções comparativas.

O âmbito deve ser suficientemente bem definido para assegurar que a extensão, a profundidade e o detalhe do estudo sejam compatíveis e suficientes para atingir os objetivos planeados (Bragança e Mateus, 2011).

Na definição do objetivo e âmbito, o objeto de estudo é descrito sob a forma de unidade funcional, isto é, de uma unidade de referência comum a todas as avaliações do ciclo de vida feitas para o sistema em estudo, de modo a permitir que os resultados obtidos para diferentes soluções possam ser comparados.

3.3.2. Inventário do Ciclo de Vida

O Inventário do Ciclo de Vida (*Life Cycle Inventory – LCI*) compreende a recolha, descrição e verificação de dados e a modelação do sistema do produto, sendo nesta fase identificados todos os *inputs* e *outputs* do sistema (Bragança e Mateus, 2011). Para tal, os *inputs* considerados são as quantidades de materiais e energia utilizados e os *outputs* são as emissões libertadas para a atmosfera e para água e os resíduos sólidos produzidos. O sistema consiste de diferentes sub-etapas, tais como a extração de

matérias-primas, o transporte, a produção, o consumo e a eliminação de resíduos, sendo o resultado da análise de inventário, um resumo de todos os dados de entrada e saída ligados à “unidade funcional” (Stripple, 2001).

Como se compreende da descrição anterior, esta é uma fase bastante demorada e trabalhosa por obrigar a uma recolha dos dados associados ao sistema produtivo junto das empresas, por exemplo, através de questionários. Contudo, cerca de 80% dos dados necessários à realização de uma análise do ciclo de vida “comum” já se encontram disponíveis, podendo evitar-se a sua recolha fastidiosa através de questionários (PRé-Consultants, 2010). Saliente-se, porém, a necessidade de uma utilização criteriosa dos dados já existentes, principalmente aqueles que provêm de fontes desconhecidas ou sobre os quais não existe informação complementar, pois a utilização de dados não adequados ao produto e aos requisitos definidos na fase anterior causará grandes enviesamentos nos resultados (Bragança e Mateus, 2011). De acordo com os mesmos autores, uma das fontes de informação mais aceites pelos especialistas em LCA é a base de dados *Ecoinvent*, da responsabilidade do *Ecoinvent Centre*, localizado na Suíça, também conhecido por *Swiss Centre for Life Cycle Inventories*.

3.3.3. Avaliação de impactes

Esta fase, definida como sendo um processo técnico, quantitativo e/ou qualitativo, para caracterizar e avaliar os efeitos dos fluxos identificados na fase anterior, consiste na avaliação sistemática dos impactes, isto é, na determinação da contribuição potencial do produto para as categorias de impacte ambiental, tais como o Aquecimento Global, Acidificação, entre outras (Bragança e Mateus, 2011).

A Norma ISO 14040 (2006) divide esta fase em quatro etapas, duas das quais obrigatórias (classificação e caracterização), e sem as quais o estudo não poderá ser denominado de análise LCA, mas sim de Inventário de Ciclo de Vida, e duas etapas opcionais (normalização e agregação).

A Figura 8 demonstra os elementos que compõe a fase de Avaliação de Impactes de Ciclo de Vida, evidenciando também a relação entre as etapas anteriormente referidas e que a seguir se apresentam com base nas descrições de Bragança e Mateus (2011).

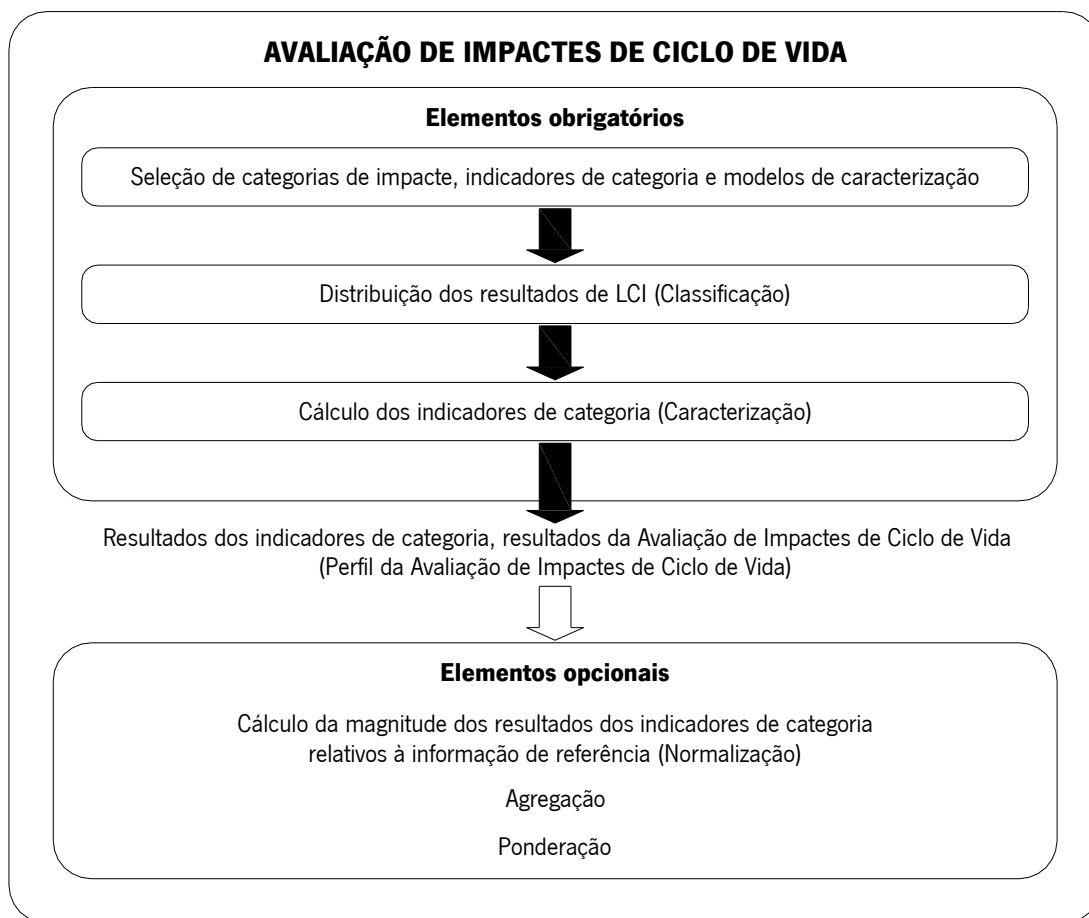


Figura 8 – Elementos que compõe a fase de Avaliação de Impactes de Ciclo de Vida (adaptado de ISO 14040 (2006))

A etapa de classificação compreende a distribuição dos resultados obtidos na fase anterior (Inventário de Ciclo de Vida) pelas várias categorias de impacte relevantes para o objetivo da análise. Nesta etapa, por exemplo, as diversas emissões atmosféricas são atribuídas às diferentes categorias de impacte, podendo determinadas emissões contribuir para diferentes categorias de impacte simultaneamente.

A fase de caracterização define a contribuição relativa de cada um dos dados obtidos na fase anterior (Inventário de Ciclo de Vida) no valor do indicador de cada categoria de impacte ambiental. Porque a contribuição dos resultados de que depende uma determinada categoria de impacte (emissões, no exemplo apresentado anteriormente) é diferente, torna-se assim necessário definir a influência de cada um deles através dos fatores de caracterização, ou seja, o peso relativo de cada um dos resultados em cada categoria.

A etapa da normalização consiste na conversão para a mesma unidade dos valores dos impactes anteriormente obtidos, permitindo desta forma a comparação entre as diversas categorias de impacte ambiental consideradas.

A etapa de agregação permite a determinação de indicadores globais, tendo por base a atribuição de um peso a cada categoria de impacte ambiental, em função da sua importância relativa.

3.3.4. Interpretação

A interpretação dos resultados consiste na última fase da Avaliação do Ciclo de Vida, sendo muitas vezes considerada a mais importante. Nesta fase, são analisados os processos e materiais que mais contribuem para os impactes de um produto e são realizadas as análises de sensibilidade e incerteza, procedendo-se, face aos resultados obtidos, à identificação da origem dos impactes, interpretação das diferenças registadas, comparação entre soluções, esclarecimento de limitações e sugestão de recomendações (Bragança e Mateus, 2011).

3.3.5. Variantes das Avaliações do Ciclo de Vida

Dependendo das fases consideradas em cada Avaliação do Ciclo de Vida, esta enquadrar-se-á numa das três variantes possíveis a seguir enumeradas e ilustradas na Figura 9 (Bragança e Mateus, 2011):

- *Cradle-to-grave* (“do berço ao túmulo”);
- *Cradle-to-gate* (“do berço à porta”);
- *Cradle-to-cradle* (“do berço ao berço”).

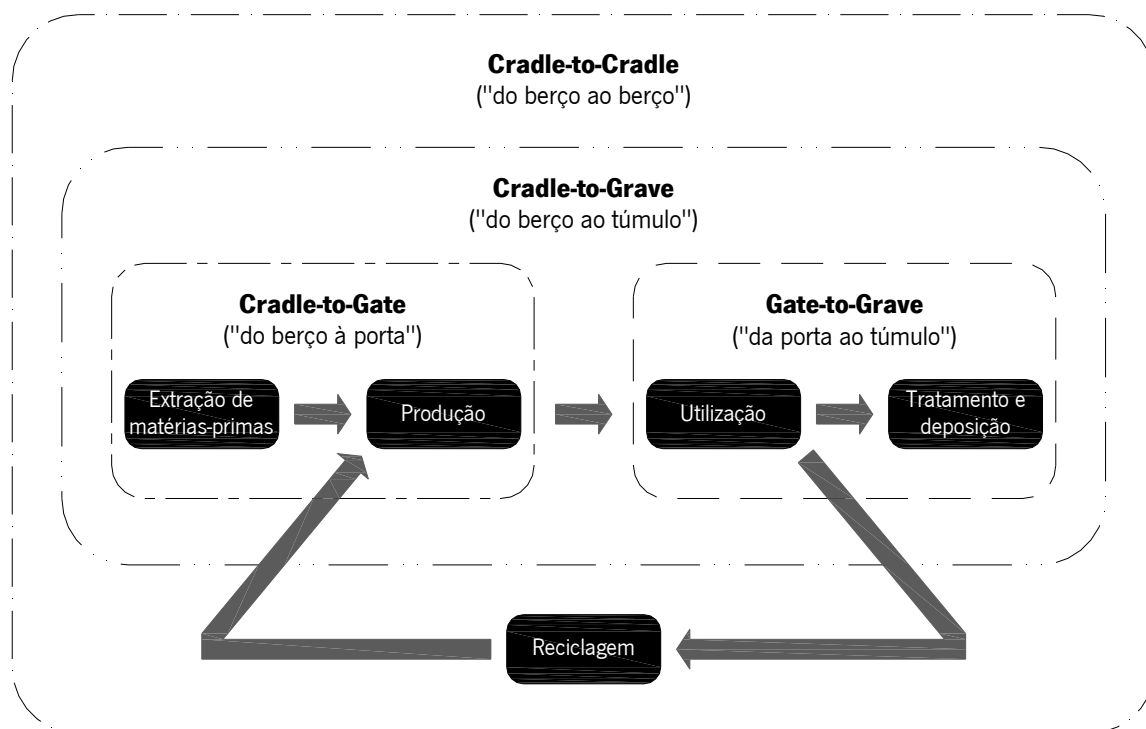


Figura 9 – Representação esquemática das fases de ciclo de vida incluídas em cada uma das três variantes de análise LCA (adaptado de Bragança e Mateus (2011))

Como se percebe pela análise da Figura 9, as análises *cradle-to-grave* ("do berço ao túmulo") incluem o ciclo de vida de um produto na sua totalidade, isto é, desde a extração das matérias-primas (berço) até à fase de deposição (túmulo), passando pelas fases intermédias de construção, utilização e conservação.

As análises *cradle-to-gate* ("do berço à porta") só consideram uma parte do ciclo de vida de um produto, mais propriamente a parte entre a extração (berço) e a porta da fábrica. Assim, este tipo de abordagem não considera qualquer processo posterior à saída do produto da fábrica, nomeadamente o seu transporte, aplicação (construção), utilização, conservação e fim-de-vida, estando normalmente na base das Declarações Ambientais de Produto ou EPD's (*Environmental Product Declaration*).

As análises *cradle-to-cradle* ("do berço ao berço") consistem numa variante das análises *cradle-to-grave*, correspondendo a última fase do ciclo de vida a um processo de reciclagem.

3.4. Fatores que influenciam a sustentabilidade dos pavimentos rodoviários

Sendo a sustentabilidade um conceito tão abrangente, existem, ao nível dos pavimentos rodoviários, inúmeras possibilidades de intervenção, nos mais variados aspetos, que conduzem a práticas mais sustentáveis. Neste âmbito as atenções voltam-se, normalmente, para aspetos como a reciclagem de pavimentos, a utilização de resíduos provenientes de atividades industriais (nomeadamente da construção), bem como a adoção de práticas e processos que permitam reduzir a quantidade de emissões gasosas para a atmosfera ou o consumo de energia. A importância destes aspetos é reconhecida e inquestionável, no entanto, centram-se demasiado na fase de construção, devendo as análises realizadas ser mais abrangentes e incluir outras fases do ciclo de vida dos pavimentos rodoviários.

Wathne (2010) apontou várias oportunidades de investigação que, uma vez exploradas, podem traduzir-se em melhorias significativas em termos de sustentabilidade. Cita, por exemplo, um relatório da *American Concrete Pavement Association* (ACPA, 2007) que enfatiza a longevidade como oportunidade de sustentabilidade primária. O relatório em questão realça as vantagens dos pavimentos rígidos que, pela sua maior duração, poderão dispensar a reabilitação ou reconstrução, o que permitirá reduzir o consumo de energia e matérias-primas, além de se evitarem os inconvenientes dos congestionamentos do trânsito (atrasos, maior consumo de combustível, maior quantidade de emissões, entre outros) provocados por essas operações.

Para além destes, existem outros fatores relativos à fase de exploração (ou uso) da estrada, e que não devem ser relegados para segundo plano por diferirem com o tipo de pavimento, como a carbonatação do betão (em pavimentos rígidos), a energia consumida para iluminação da estrada, o albedo, a resistência ao rolamento ou a produção de lixiviados. Estes aspetos são alguns (porventura os principais) dos passíveis de influenciar a sustentabilidade dos pavimentos rodoviários ao longo do seu ciclo de vida, pelo que se apresenta de seguida uma breve descrição de cada um deles.

3.4.1. Carbonatação do betão

A carbonatação do betão nos pavimentos rígidos corresponde à captação de carbono pelo betão, compensando parcialmente o CO₂ que foi libertado durante a produção do cimento. Trata-se de um

processo muito lento, sendo a taxa de absorção de CO₂ difícil de determinar e dependente de aspetos como a porosidade do betão, teor de cimento, relação água cimento e temperatura e humidade relativa do ambiente circundante (Gajda (2001); Engelsen *et al.* (2005); Lagerblad (2006)).

Refira-se, contudo, que o processo de carbonatação do betão potencia o processo de corrosão das armaduras. Este fenómeno surge a partir da difusão do dióxido de carbono (CO₂) atmosférico para o interior dos poros do betão e da sua posterior reação química com os constituintes sólidos carbonatáveis, traduzindo-se estas reações no avanço de uma “frente de carbonatação” a partir da superfície, acompanhado de uma queda do pH de valores de aproximadamente 13 até valores inferiores a 9, permitindo que a corrosão do aço possa ter início (Simas, 2007).

Existem vários métodos para verificar se uma determinada zona de betão se encontra ou não carbonatada, nomeadamente (Simas, 2007): a difração de Raio-X (XRDA), a análise térmica diferencial (DTA), a termogravimetria (TGA) e a espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR).

Não obstante da fiabilidade e rigor dos métodos acima referidos, a utilização de fenolftaleína, que possui um ponto de viragem de coloração coincidente com os valores de pH para os quais se considera existir carbonatação (próximos de 9), afigura-se como um método rápido, fácil de executar e económico. Conforme referido acima, um betão perfeitamente são apresenta um pH na ordem dos 13, caindo este valor para próximo de 9 quando o betão sofre carbonatação, sendo precisamente a partir dessa gama de valores que a fenolftaleína passa de incolor para uma tonalidade rosa-carmim ou lilás (Simas, 2007).

A especificação LNEC E 391 (1993) estipula um procedimento para determinar a profundidade de carbonatação através da utilização de fenolftaleína. Para tal, procede-se à extração de uma amostra de betão, pulveriza-se com uma solução alcoólica de fenolftaleína a 0,1% e mede-se a profundidade de carbonatação com o auxílio de uma régua (Figura 10).

Analisando as emissões associadas aos materiais utilizados em pavimentos betuminosos e em pavimentos de betão, Fernández-Sánchez *et al.* (2015) não detetaram diferenças significativas na fase de conservação, apesar da capacidade seis vezes superior dos pavimentos em betão para absorver

CO₂, o que indica que a carbonatação do betão não deverá ter um grande impacto sobre as emissões totais.

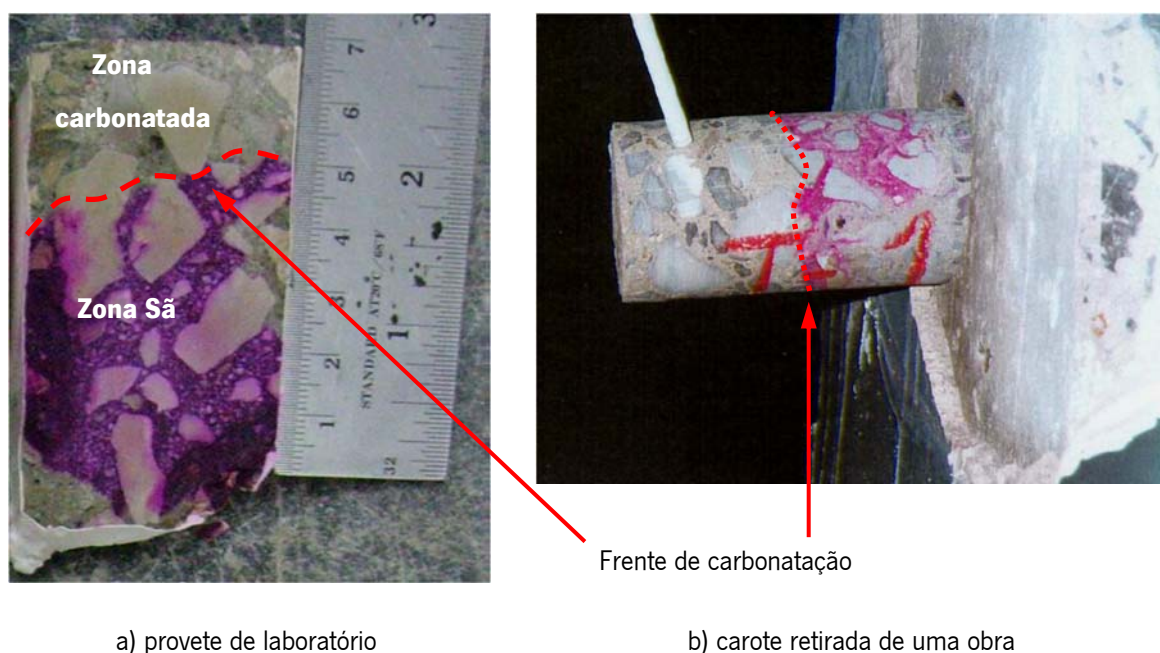


Figura 10 – Medição da frente de carbonatação com solução de fenolftaleína (adaptado de Simas (2007))

3.4.2. Energia consumida para iluminação da estrada

Quanto à iluminação necessária para a estrada, esta depende de fatores como o tipo de material e a idade do pavimento, os quais influenciam a refletividade da luz. Desta forma, a iluminação necessária para garantir as mesmas condições visuais será diferente para cada tipo de pavimento. Adrian e Jobanputra (2005) concluíram que pavimentos flexíveis exigem um gasto de energia 57% superior aos pavimentos em cimento para obter uma iluminação adequada. Contudo, a diferença em termos de reflectância é menor nos pavimentos envelhecidos, uma vez que o asfalto tende a clarear com o tempo, enquanto os pavimentos em betão tendem a escurecer (Santero *et al.*, 2011a).

A energia necessária para iluminação representa cerca de 20% da eletricidade consumida (Iacomussi *et al.*, 2015). Sendo a iluminação das estradas responsável pelo consumo de grandes quantidades de energia, a procura e utilização de tecnologias com maior eficiência energética torna-se também indispensável. Exemplo disso é a tecnologia LED (*Light Emitting Diodes*) devido à sua maior eficiência, benefícios ambientais e duração (Qian *et al.*, 2016). Devido a esses aspetos, esta tecnologia tem vindo

a aumentar a sua quota de mercado, esperando-se que até 2025 possa substituir entre 25 e 30% dos dispositivos de iluminação incandescentes (Avrenli *et al.*, 2012).

3.4.3. Albedo

A radiação solar que atinge um pavimento tanto pode ser absorvida por este ou refletida para a atmosfera (Figura 11). O albedo consiste numa medida da capacidade da superfície dos pavimentos para refletir a radiação solar que sobre eles incide, podendo variar entre 0 (absorção total) e 1 (reflectância total). O albedo é, no fundo, a razão entre a radiação solar refletida por uma superfície e a radiação total que incide sobre essa superfície, ou seja, o valor do albedo surge também como a percentagem de radiação solar que a superfície é capaz de refletir.

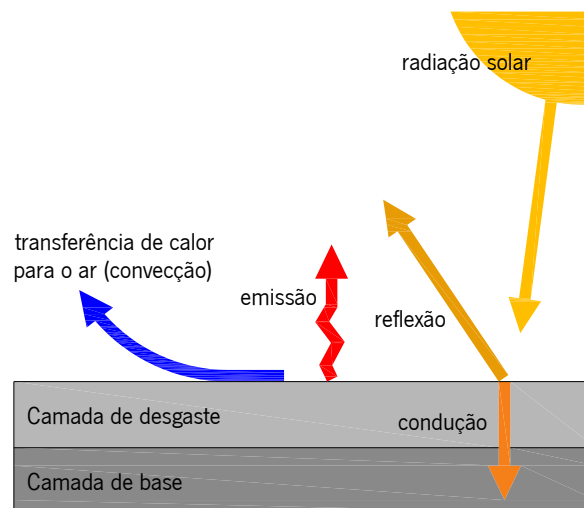


Figura 11 – Balanço de energia na superfície do pavimento (adaptado de Kaloush *et al.* (2008))

O albedo esperado para pavimentos betuminosos situa-se entre 0,05 e 0,20, enquanto para pavimentos em cimento deverá variar entre 0,25 e 0,40 (Pomerantz *et al.* (1997); Pomerantz e Akbari (1998); Marceau e VanGeem (2007)). Alguns dos autores citados defendem ainda que fatores como a idade do pavimento e o tipo de superfície influenciam o seu albedo. No caso dos pavimentos betuminosos o albedo tende a aumentar com a idade, uma vez que estes tendem a clarear, ao contrário dos pavimentos de betão em que o albedo tende a diminuir devido ao escurecimento da superfície.

Um aumento de 10% do albedo de um pavimento permite reduzir a temperatura da superfície em 4°C (Pomerantz *et al.*, 2000)⁵. Assim sendo, numa perspetiva climática, são preferíveis pavimentos com albedos maiores por permitirem reduzir o efeito das ilhas de calor urbano.

As ilhas de calor urbano formam-se em áreas urbanas densas, sendo o resultado da absorção da radiação pelas construções como estradas, fachadas ou telhados, provocando o aumento da temperatura ambiente (Figura 12). A temperatura elevada aumenta o consumo de energia para dispositivos de arrefecimento urbanos e acelera a formação de nevoeiro fotoquímico (Akbari *et al.*, 2001).

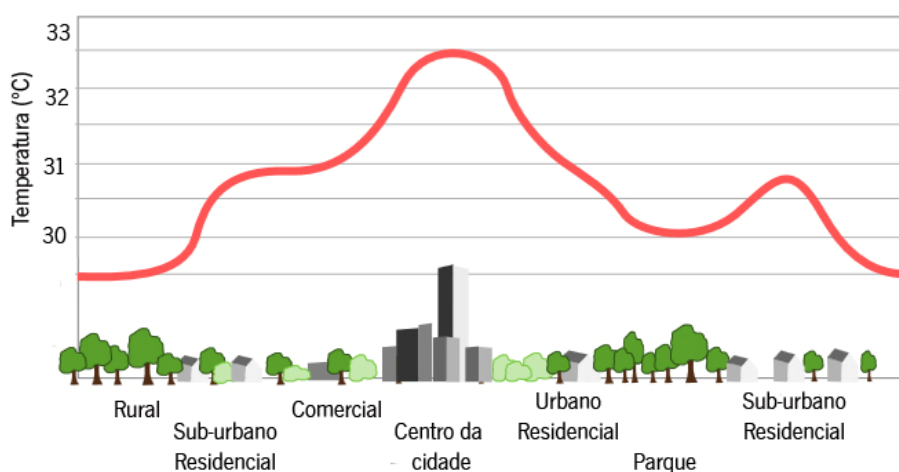


Figura 12 – Representação esquemática de uma ilha de calor (adaptado de Munson's City (2012))

3.4.4. Resistência ao rolamento

A resistência ao rolamento representa a perda de energia do veículo devido à interação deste com o pavimento e é medida em Newtons (N), sendo uma medida da energia dissipada por unidade de distância percorrida, conforme demonstra a Equação 7 (Woodside *et al.*, 2003):

$$\text{Resistência ao rolamento} = \frac{N \cdot m}{m} = N \quad (7)$$

Enquanto um material puramente elástico recupera toda a energia imposta num determinado carregamento quando este é removido, e um material puramente viscoso não recupera qualquer

⁵ Citado por Kaloush *et al.* (2008)

energia, sendo a energia que deformou o material totalmente convertida sob forma de calor, os materiais viscoelásticos, como a borracha dos pneus, apresentam um comportamento que combina a recuperação elástica com alguma perda de energia (TRB, 2006).

A força de resistência ao rolamento é assim devida, principalmente, às propriedades viscoelásticas dos compostos de borracha usados no fabrico dos pneus que ao se deformarem dissipam energia sob a forma de calor. Quando o pneu gira, é deformado pela carga exercida sobre ele, fazendo com que este fique plano na zona de contacto pneu-superfície (Figura 13). A repetida deformação dos pneus causa uma perda de energia devida a um fenómeno de histerese que provoca uma força de resistência ao rolamento (Santos, 2012).

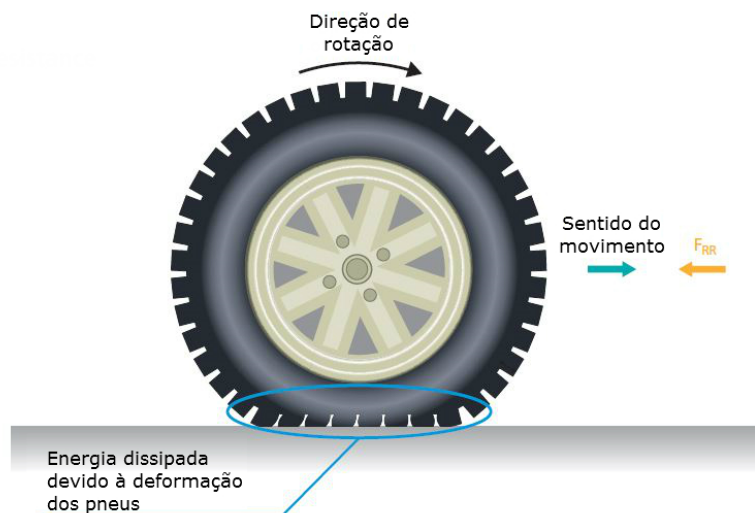


Figura 13 – Deformação de um pneu sob a ação da carga imposta pelo veículo (adaptado de Michelin (2003))

Também a textura da superfície da estrada cria deflexões no pneu o que provoca perdas de energia extra se a borracha do pneu não estiver livre do fenómeno de histerese (Sandberg, 2011). O fenómeno de histerese é provocado essencialmente por fatores como a deflexão da superfície do pavimento e a deformação dos pneus (Menzies e Zucchetto, 2006).

As perdas de energia sob a forma de calor devem-se essencialmente a três mecanismos (Bendtsen, 2004):

- Perdas devido a macro deformações no pneu (deflexão nas paredes laterais do pneu);
- Perdas devido a micro deformações na área de contato entre o pneu e o pavimento;
- Perdas devido à fricção de deslizamento na área de contato entre o pneu e o pavimento.

A aplicação das cargas dos veículos ao pavimento implica o aparecimento de uma reação contrária, isto é, uma força ascendente do pavimento para o pneu. Medindo essa reação normal, na zona de contacto entre o pneu e o pavimento, constata-se que a reação do solo é maior na parte frontal do pneu (no sentido do movimento) do que na sua retaguarda, encontrando-se assim a resultante de todas estas forças adiante do eixo da roda. Esta translação da força normal ao peso do carro (a resultante, apresentada na Figura 14 como Z) leva a que haja um binário oposto ao sentido de rotação das rodas, sendo esta força designada de força de resistência ao rolamento, e devida à perda de energia causada pela deformação do pneu na zona de contacto (Michelin, 2003).

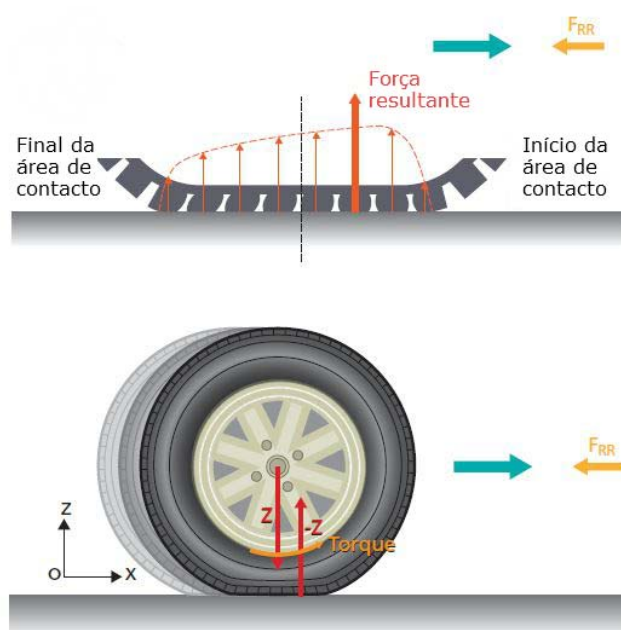


Figura 14 – Forças verticais na superfície de contacto entre o pneu e o pavimento (traduzido de Michelin (2003))

Existem, contudo, diversos fatores capazes de influenciar a resistência ao rolamento. Conforme apresentado no Quadro 1, a resistência ao rolamento depende de alguns fatores relativos aos pneus, ao ambiente e aos pavimentos, sendo no presente documento dada especial atenção a estes últimos devido à sua relevância para os trabalhos adiante descritos.

Quadro 1 – Fatores que afetam a resistência ao rolamento (Woodside *et al.*, 2003)

Caraterísticas dos pneus	Condições de operação dos pneus	Condições ambientais	Caraterísticas superficiais da estrada
Construção: - Carcaça - Lonas de topo - Flanco Piso/banda de rolamento: - Composto - Padrão - Profundidade - Ranhuras/sulcos	Pressão de enchimento Carga Velocidade Ângulo de deslize Ângulo de curvatura Força motriz/travagem	Temperatura Água Neve Gelo	Micro-textura Macro-textura Mega-textura

Dos fatores acima apresentados, a superfície da estrada afigura-se como um fator-chave na definição da resistência ao rolamento, no entanto, os fatores relativos às caraterísticas da estrada poderão não se limitar à micro, macro e mega-textura. Num relatório sobre impactes ambientais e eficiência de combustíveis dos pavimentos rodoviários (EAPA/Eurobitume, 2004), após as micro, macro e mega-textura serem definidas como sendo aquelas às quais correspondem comprimentos de onda menores que 0,5 mm, entre 0,5 mm e 50 mm e entre 50 mm e 500 mm, respetivamente, é acrescentada ainda a irregularidade, correspondente a comprimentos de onda superiores a 500 mm, como outro fator relativo às caraterísticas superficiais passível de influenciar a resistência ao rolamento.

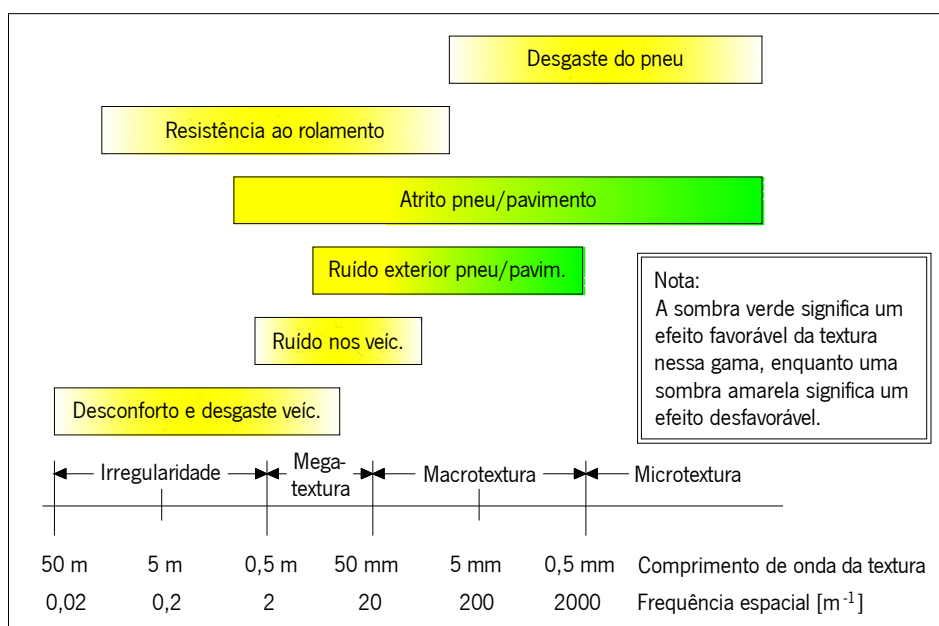


Figura 15 – Intervalos em termos de comprimentos de onda e frequência espacial da textura e previsão dos seus efeitos mais significativos (adaptado de Sandberg e Ejsmont (2002))

Contudo, relativamente aos fatores da superfície da estrada suscetíveis de influenciar a resistência ao rolamento, Bendtsen (2004), baseando-se em Sandberg e Ejsmont (2002), é mais restrito ao considerar que esta depende da irregularidade e mega-textura do pavimento e, em certa medida, também da gama mais áspera da macro-textura, conforme demonstra a Figura 15.

Também Schmidt e Ullidtz (2010) abordam a resistência ao rolamento. Embora apresentem outros fatores passíveis de a influenciar, nomeadamente o raio da roda, a velocidade, a aderência da superfície e o micro-deslizamento entre a roda e a superfície, consideram que a resistência ao rolamento ocorre principalmente devido à deformação do objeto e da superfície. Estes autores, numa abordagem mais genérica, e citando a *Society of Automotive Engineers*, enumeraram os seguintes fatores como sendo os que mais influenciam a resistência ao rolamento:

- Atrito na suspensão das rodas;
- Atrito na carcaça e banda de rolamento dos pneus, devido à sua deformação quando rolam no pavimento;
- Deformação do pavimento;
- Textura da superfície do pavimento e sua penetração no pneu;
- Resistência do ar sobre as rodas.

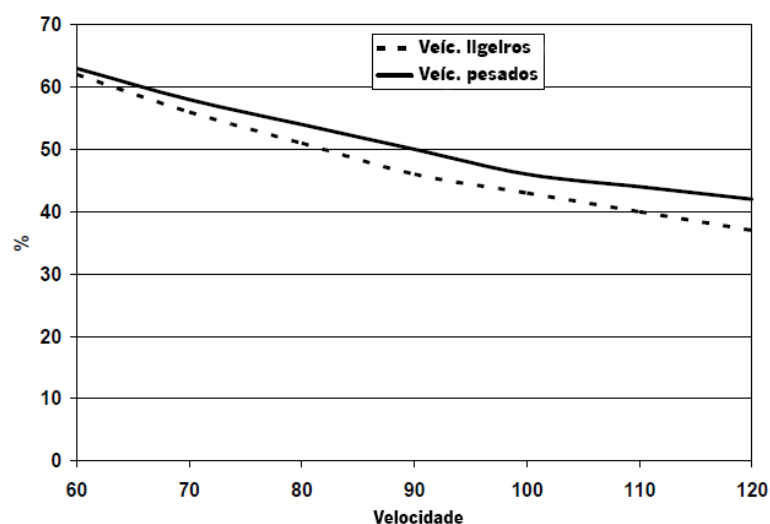


Figura 16 – Exemplo ilustrativo da percentagem de energia total consumida devido à resistência ao rolamento (adaptado de Nokian Tyres plc (2004)⁶)

A importância da resistência ao rolamento diminui com o aumento da velocidade. A uma velocidade de

⁶ Citado por Bendtsen (2004)

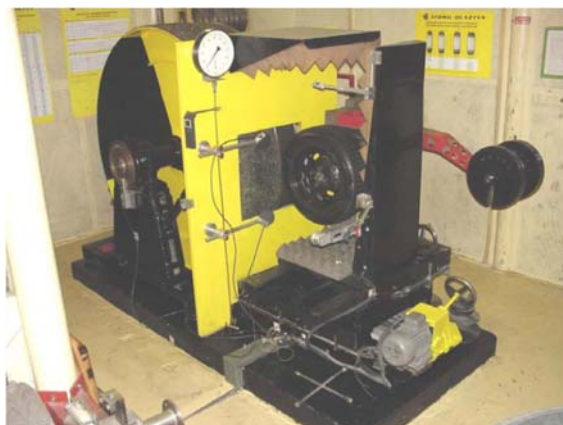
60 km/h, a perda de energia devido à resistência de rolamento é de 60% da energia total consumida, enquanto a 120 km/h essa perda ronda os 38%, conforme demonstra a Figura 16 (Bendtsen, 2004).

A força da resistência ao rolamento aumenta também com a carga aplicada sobre o pneu, e diminui com o aumento da pressão do ar dos pneus (Ejsmont, 1990).

A resistência ao rolamento pode ser medida em laboratório, utilizando diferentes tipos de equipamentos de ensaio, como tambores equipados com réplicas das superfícies dos pavimentos (Figura 17), ou em estradas reais usando um veículo instrumentado ou um atrelado (Figura 18). É também possível utilizar um método indireto que consiste em medir o consumo de energia para a deslocação de uma certa distância em diferentes pavimentos com os mesmos pneus do carro (Bendtsen, 2004).



a) Equipamento do *Federal Highway Research Institute* (BAST), na Alemanha (Bergiers *et al.*, 2011)



b) Equipamento da *Technical University of Gdansk* (TUG), na Polónia (Bergiers *et al.*, 2011)



c) Colocação das réplicas das superfícies utilizadas no tambor da TUG (Sandberg *et al.*, 2013)



d) Equipamento do *Dynamics Laboratory at Dunlop Tyres Ltd*, na Inglaterra (Sandberg *et al.*, 2011)

Figura 17 – Tambores de ensaio da interação pneu-pavimento para medições da resistência ao rolamento em laboratório



a) Equipamento do *Federal Highway Research Institute (BAST)*, na Alemanha



b) Equipamento do *Belgian Road Research Centre (BRRC)*, na Bélgica



c) Equipamento da *Technical University of Gdansk (TUG)*, na Polónia



d) Conjunto dos atrelados das três instituições

Figura 18 – Atrados para medição da resistência ao rolamento em estradas (Bergiers *et al.*, 2011)

Gent e Walter (2006) enfatizaram que a resistência ao rolamento num pneu é frequentemente calculada a partir de parâmetros relacionados com o funcionamento e a forma dos pneus, podendo não corresponder a uma força física real, pelo que deve ser medida como a perda de energia por distância percorrida. Nesse mesmo sentido, Sandberg (2011) considera a medição em estrada mais vantajosa, por refletir a verdadeira situação em veículos, ao estar diretamente relacionada com a eficiência de combustível do veículo.

O consumo de energia do próprio tráfego durante a vida de uma estrada é de extrema importância, sendo responsável por 95 a 98% do consumo total de energia imputável a essa estrada, sendo as atividades de construção, conservação e operação responsáveis pelos restantes 2 a 5% de energia consumida (EAPA/Eurobitume, 2004). Por essa razão, o mesmo relatório considera compreensível que se foquem as atenções no estudo de como os diferentes pavimentos afetam o consumo de combustível.

Atendendo a que, atualmente, 24% do total de energia consumida na Europa é utilizada para o transporte, sendo os veículos rodoviários responsáveis por cerca de 83% desse consumo, a medição e gestão da resistência ao rolamento representam uma das abordagens mais promissoras para reduzir a energia consumida e a quantidade de CO₂ emitida pelas infraestruturas rodoviárias (Haider *et al.*, 2011).

Enquanto outras resistências atuam apenas quando o veículo está sob certas condições de movimento, a resistência ao rolamento atua a partir do momento em que as rodas do veículo saem do estado de inércia (Diniz, 2009).

De acordo com Heywood (1988) uma parte da potência útil do motor é utilizada para vencer a resistência ao rolamento. Por essa razão, LaClair e Truemner (2005)⁷ explicam que uma redução da resistência ao movimento, ou de qualquer outra perda de energia no veículo, se traduz numa redução proporcional da força que o motor tem que fornecer para que o veículo se movimente, resultando, conseqüentemente, numa redução do consumo de combustível.

Bendtsen (2004) ao estudar a distribuição da utilização de energia, relativa à média de dez modos de condução diferentes (incluindo aceleração e travagem), concluiu existirem as diferenças no total de energia consumida apresentadas no Quadro 2, donde se conclui, por exemplo, que uma alteração de 5% na resistência ao rolamento influenciará o consumo total de energia em apenas 0,85%.

Quadro 2 – Efeito sobre o total de energia consumida em função de diferentes mudanças na resistência ao rolamento (Bendtsen, 2004)

Alteração na resistência ao rolamento (%)	1	5	10	25	50
Alteração no consumo total de energia (%)	0,14	0,85	2,33	6,41	16,62

Também Mclean e Foley (1998) fizeram uma recolha dos estudos realizados na década de 80 relativos ao efeito da irregularidade dos pavimentos no consumo de combustível, considerando a velocidade constante, tendo os resultados sido convertidos para a base comum de "percentagem de alteração no consumo de combustível, por unidade de IRI" (Quadro 3).

⁷ Citado por Diniz (2009)

Quadro 3 – Resumo dos resultados obtidos em estudos sobre o efeito da rugosidade no consumo de combustível a velocidade constante (McLean e Foley, 1998)

Fonte	Método	Intervalo IRI	Tipo de veículo	% Variação por unidade IRI	
				Resist. Rolam.	Cons. de combust.
(Young, 1988)	<i>Coast down</i> – irregularidade artificial	1,3 a 4,0	Pesado		4,1
	Medição direta de combustível – irregularidade artificial	3,3 a 5,6	Ligeiro		3,1
	Medição direta de combustível – veículos lado a lado	2,3 a 4,4	Ligeiro		3,6
	Medição direta de combustível – variedade de superfícies	1,7 a 5,4	Ligeiro		0,8
(Ross, 1982)	Medição direta de combustível – variedade de superfícies	0,5 a 3,7	Ligeiro		0,4
(Bester, 1984)	Resistência ao rolamento – variedade de superfícies	1,4 a 5,5	Ligeiro	2,6	0,5
(Descornet, 1990)	Resistência ao rolamento – variedade de superfícies.	0,8 a 7,7	Ligeiro	4,0	0,8
(Laganier e Lucas, 1990)	Resistência ao rolamento – variedade de superfícies.	1,0 a 6,0	Ligeiro	6,0	1,2
(Sandberg, 1990)	Medição direta de combustível – variedade de superfícies	1,0 a 6,0	Ligeiro		1,7
(du Plessis <i>et al.</i> , 1990)	Resistência ao rolamento – variedade de superfícies	1,2 a 15,0	Ligeiro	3,4	0,7
			Pesado	4,4	1,1
(Watanatada <i>et al.</i> , 1987)	Resistência ao rolamento – variedade de superfícies	2,0 a 14,0	Ligeiro	2,5	0,5
			Pesado	1,8	0,5

Por seu lado, Amos (2006) comparou os consumos de combustível em pavimentos que inicialmente se encontravam degradados e após a sua reabilitação, tendo constatado também as diferenças ao nível do consumo de combustível. Os pavimentos no seu estado inicial apresentavam valores médios de IRI (*International Roughness Index*) de 130,23 polegadas/milha (aproximadamente 2,06 m/km), tendo baixado para 60,99 polegadas/milha (aproximadamente 0,96 m/km) com a reabilitação. Essas alterações ao nível da superfície dos pavimentos traduziram-se num aumento de 2,4% da distância percorrida pelos camiões utilizados no estudo, para a mesma quantidade de diesel consumido, situando-se esse aumento em aproximadamente 1% no caso dos veículos ligeiros, mais propriamente um SUV (*Sport Utility Vehicle*) a gasolina.



Figura 19 – Superfície de um dos pavimentos analisados antes e depois da reabilitação superficial (Amos, 2006)

Conclui-se assim que um dimensionamento criterioso dos pavimentos permitirá maximizar a economia de combustível, diminuindo assim o consumo de energia e as emissões gasosas libertadas para a atmosfera. Por exemplo, os pavimentos flexíveis ao deformarem-se sob a ação dos veículos obrigarão a um maior dispêndio de energia para movimentar o veículo, havendo vários estudos que defendem que, por isso, os pavimentos rígidos conduzem a uma poupança de combustível (Zaniewski (1989); Taylor e Patten (2006); Wathne (2010); Gustafsson *et al.* (2013); Willis *et al.* (2015)).

A questão da influência da rigidez dos pavimentos no consumo de combustível deverá, contudo, ser alvo de especial atenção, dado não influenciar da mesma forma os consumos dos veículos ligeiros e pesados. Num relatório, publicado ainda nos finais dos anos 80, Zaniewski (1989) demonstrava que o consumo de combustível nos veículos ligeiros não era afetado pelo tipo de superfície do pavimento (betuminosa ou betão de cimento), ao contrário dos veículos pesados que apresentavam menores consumos de combustível em pavimentos de betão de cimento, comparativamente à circulação em pavimentos betuminosos.

Devido aos estudos realizados nesta matéria, o projeto MIRIAM (acrónimo de “*Models for rolling resistance In Road Infrastructure Asset Management systems*”) pode considerar-se uma das principais referências ao nível dos projetos de investigação na área da resistência ao rolamento, derivando dele

algumas das referências anteriormente citadas, nomeadamente Bergiers *et al.* (2011), Haider *et al.* (2011), Sandberg (2011) ou Sandberg *et al.* (2011).

Por fim, deve referir-se também a revisão bibliográfica realizada por Willis *et al.* (2015) sobre os efeitos das propriedades dos pavimentos na resistência ao rolamento, em que foram analisados 34 trabalhos desenvolvidos entre 1974 e 2013, dos quais se considera que, os principais aspetos aí abordados, foram já sendo apresentados neste trabalho.

3.4.5. Produção de lixiviados

A produção de lixiviados é uma temática que tem despertado interesse a alguns investigadores, uma vez que alguns materiais de pavimentação contêm substâncias que representam uma ameaça à água potável e ecossistemas aquosos. No entanto, têm sido publicados diversos estudos que afirmam ser pequeno o risco de lixiviação dos contaminantes em concentrações perigosas no escoamento de águas pluviais (Kriech (1990); Brandt e De Groot (2001); Marion *et al.* (2005)). De uma forma geral, a bibliografia é consensual ao considerar que os contaminantes encontrados nos escoamentos superficiais são provenientes dos veículos e não tanto dos materiais do pavimento. Uma possível exceção a estas conclusões é apresentada por Brandtley e Townsend (1999), no que se refere ao risco de lixiviação em pavimentos contendo materiais reciclados, os quais, durante a sua utilização inicial foram sujeitos à exposição de partículas provenientes dos veículos, como desgaste dos pneus, óleos, lubrificantes, derrame de combustíveis, entre outros. No entanto, e apesar de se saber que os pavimentos contendo materiais reciclados apresentam níveis mais elevados de poluentes, em comparação com os pavimentos construídos com materiais novos, há razões para acreditar que, mesmo estes, não representam uma séria ameaça ambiental (Brandtley e Townsend (1999); Legret *et al.* (2005)).

3.5. Metodologias de Avaliação do Ciclo de Vida de pavimentos rodoviários

Existem na bibliografia várias metodologias para Avaliação do Ciclo de Vida dos pavimentos rodoviários que, conforme referido anteriormente, incidem sobretudo nas atividades de extração, produção, transporte e aplicação dos materiais. Santero *et al.* (2011b) analisaram e compararam 15

metodologias para Avaliação do Ciclo de Vida de pavimentos rodoviários, tendo comprovado essa lacuna, conforme demonstra o Quadro 4.

Quadro 4 – Componentes do ciclo de vida dos pavimentos rodoviários consideradas pelas diferentes metodologias (adaptado de Santero *et al.* (2011b))

Autor (ano)	Fase 1		Fase 2		Fase 3					Fase 4		Fase 5		
	Extração dos materiais e produção	Transporte (matérias-primas)	Equipamentos no local (construção)	Atraso do trânsito	Carbonatação	Iluminação	Albedo	Resistência ao rolamento	Lixiviados	Fase dos materiais (conservação)	Fase de construção (conservação)	Equipamento no local (fim de vida)	Transporte (fim de vida)	Produção de materiais (reciclagem)
Häkkinen e Mäkelä (1996)	•	•	•	•	•	•				•	•			
Horvath e Hendrickson (1998)	•													
Roudebush (1999)	•		•							•	•			
Berthiaume e Bouchard (1999)	•									•				
Mroueh <i>et al.</i> (2000)	•	•	•					•		•	•			
Stripple (2001)	•	•	•							•	•			
Nisbet <i>et al.</i> (2001)	•	•	•							•	•			
Park <i>et al.</i> (2003)	•		•							•	•	•	•	
Treloar <i>et al.</i> (2004)	•									•				
Zapata e Gambatese (2005)	•		•											
Athena Institute (2006)	•	•	•							•	•			
Chan (2007)	•	•	•	•										
Muga <i>et al.</i> (2009)	•	•	•							•	•			
Huang <i>et al.</i> (2009a)	•	•	•	•										
White <i>et al.</i> (2010)	•	•												

Fase 1 - Matérias-primas e produção; Fase 2 - Construção; Fase 3 - Utilização; Fase 4 - Conservação; Fase 5 - Fim de vida

Conforme se constata pela análise do quadro anterior, a maior parte das metodologias analisadas é bastante omissa no que refere às fases de utilização e fim de vida. Alguns aspetos, como a carbonatação, iluminação e produção de lixiviados, ou o desmantelamento e transporte do pavimento em fim de vida, ainda são abordados, cada um deles, por uma das metodologias analisadas, contudo, outros aspetos como o albedo, a resistência ao rolamento ou o aproveitamento (reciclagem) do

material resultante do desmantelamento do pavimento, não são abordados em nenhuma das metodologias referidas. Tal facto poderá, de certa forma, desvirtuar os estudos assim realizados por não contemplarem componentes potencialmente influentes do ciclo de vida analisado.

Refira-se, contudo, que começam já a surgir outras metodologias que procuram explorar essas fases até agora negligenciadas. Uma análise efetuada recentemente por AzariJafari *et al.* (2016) aos estudos que tem vindo a ser realizados desde 2011 conclui que se tem vindo a aumentar o foco na fase de utilização das estradas, com especial atenção para o consumo de combustível e para as emissões resultantes da irregularidade dos pavimentos e dos atrasos do tráfego (Quadro 5).

Quadro 5 – Componentes relacionadas com a utilização dos pavimentos rodoviários consideradas por algumas das metodologias recentemente desenvolvidas (adaptado de AzariJafari *et al.* (2016))

Autor (ano)	Atraso do trânsito	Rugosidade	Rigidez do pavimento	Albedo	Iluminação
Zhang <i>et al.</i> (2008)		•			
Zhang <i>et al.</i> (2010)		•			
Wang <i>et al.</i> (2012)		•			
Noshadravan <i>et al.</i> (2013)	•	•	•	•	•
Qian <i>et al.</i> (2013)		•			
Vidal <i>et al.</i> (2013)	•				
Araújo <i>et al.</i> (2014)		•			
Liu <i>et al.</i> (2015)	•	•			
Santos <i>et al.</i> (2015)	•	•			
Chen <i>et al.</i> (2016)	•	•			

Das metodologias apresentadas no Quadro 5, destaca-se a proposta por Noshadravan *et al.* (2013) dado considerar todas as componentes relacionadas com a utilização dos pavimentos. Refira-se, contudo, que o impacte ambiental da fase de utilização é, nesta metodologia, determinado sob a forma de um diferencial relativo a uma situação tomada como base, facto que poderá inviabilizar análises comparativas relativas a todo o ciclo de vida. Na verdade, esta metodologia resulta de uma compilação de dados provenientes de diversas fontes, nomeadamente, o consumo adicional de combustível devido à deflexão do pavimento é determinado pelo modelo desenvolvido por Akbarian *et al.* (2012), e o

consumo adicional de combustível devido à alteração da irregularidade do pavimento é determinado por um modelo empírico apresentado por Zaabar e Chatti (2010). Outros aspetos considerados, como o albedo, a carbonatação do betão e a iluminação, tiveram por base os trabalhos de Akbari *et al.* (2009), Lagerblad (2006) e Santero e Horvath (2009), respetivamente. Relativamente aos atrasos do trânsito, embora, de acordo com o Quadro 5 estes sejam contabilizados pela referida metodologia, no documento em que esta é apresentada (Noshadravan *et al.*, 2013) não é feita qualquer referência, além da inclusão desse fator numa figura que caracteriza a análise do ciclo de vida dos pavimentos, pelo que não é possível perceber se, e de que forma, foram considerados os atrasos do trânsito nesta metodologia.

A consciencialização da importância das análises do ciclo de vida, e o desenvolvimento de novas metodologias, têm sido impulsionados também pelo aparecimento de projetos dedicados a estas temáticas. Um exemplo disso mesmo é o projeto da Comissão Europeia denominado de Ecolabel e que ajuda a identificar produtos e serviços que tenham um impacto ambiental reduzido durante o seu ciclo de vida, isto é, desde a extração das matérias-primas até a produção, utilização e eliminação. Consiste, portanto, na atribuição de um “rótulo ecológico” de forma a promover a excelência ambiental (European Commission, 2016).

Embora existam já mais de 17000 produtos na União Europeia que viram ser-lhes atribuído esse rótulo ecológico, não existem, entre esses, referências destinadas às estradas ou infraestruturas. Nesse contexto surgiu o projeto LCE4ROADS, o qual pretende integrar, numa única abordagem, os aspetos económicos, técnicos e sociais para avaliação das infraestruturas rodoviárias e dos seus materiais de construção. Além de um guia e de um *software* multicritério para a certificação das estradas, este projeto pretende definir critérios e fornecer recomendações à indústria e às partes interessadas, com vista à adoção de práticas mais seguras e sustentáveis nos projetos de construção, conservação e renovação das estradas (LCE4ROADS, 2016).

CAPÍTULO 4

DESENVOLVIMENTO DE UMA METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DOS PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS

4.1. Enquadramento da Metodologia

Conforme definido no capítulo anterior, a Norma ISO 14040 (2006) divide o processo de Avaliação do Ciclo de Vida em 4 fases: (1) Definição do objetivo e âmbito do estudo; (2) Inventário do Ciclo de Vida; (3) Avaliação de impactos; (4) Interpretação.

Qualquer avaliação do ciclo de vida começa com uma definição do objetivo e âmbito do estudo. Nesta fase, além de se apresentarem as motivações que levaram ao desenvolvimento desta metodologia e os objetivos a serem alcançados, devem ser também abordados outros aspetos que influenciam o estudo, nomeadamente a utilização prevista para os resultados, o público-alvo, ou seja, a quem os resultados do estudo poderão ser úteis/interessar, a unidade funcional, bem como os requisitos e limitações do sistema.

Segue-se o desenvolvimento de um inventário em que todos os encargos imputáveis ao produto ou processo, durante a sua vida útil, são coletados e quantificados. Nesta fase são identificados todos os *inputs* (quantidades de materiais e energia utilizados) e *outputs* (emissões libertadas para a atmosfera e os resíduos sólidos produzidos) do sistema, o qual consiste em diferentes sub-etapas, como a extração de matérias-primas, transporte, produção e aplicação de misturas, entre outras.

Na fase de avaliação de impactes, procede-se a uma caracterização e avaliação dos efeitos dos fluxos identificados na fase anterior, determinando a contribuição potencial do produto para as diferentes categorias de impacte ambiental, tais como o aquecimento global ou a acidificação, entre outras.

Conforme referido no capítulo anterior, a Norma ISO 14040 (2006) divide esta fase em quatro etapas, duas das quais obrigatórias (classificação e caracterização), e duas etapas opcionais (normalização e agregação).

Na presente metodologia procurou-se dar particular atenção aos consumos de energia e de recursos materiais, e a alguns efeitos ecológicos, com especial destaque para o potencial de aquecimento global. As análises realizadas incidiram essencialmente nas duas etapas obrigatórias anteriormente referidas.

A última fase, que corresponde à interpretação dos resultados, permite analisar e identificar os processos e materiais que mais contribuem para os impactes do sistema em análise. Esta, que é por vezes considerada a fase mais importante, deve permitir estabelecer comparações entre as diversas soluções, de forma a dar-se resposta aos objetivos anteriormente formulados.

4.2. Objetivo e âmbito de estudo

O objetivo deste estudo consiste em determinar os impactes (particularmente ambientais e económicos) associados a diferentes pavimentos rodoviários. Conforme referido no capítulo anterior, a maioria das metodologias existentes para análise do ciclo de vida de pavimentos rodoviários, devido à dificuldade de obtenção de dados relativos a todas as fases do ciclo de vida, concentram-se quase que exclusivamente nas atividades de extração, produção, transporte e aplicação de materiais, isto é, a construção de estrada. Sendo a fase de utilização predominante no que diz respeito ao consumo de energia (combustível) e, conseqüentemente, nas emissões gasosas libertadas para a atmosfera, esta deverá ser uma abordagem mais abrangente, que considere todas as fases do ciclo de vida, com especial atenção na fase de utilização.

Um dos principais fatores a considerar durante a fase de utilização da estrada é a resistência ao rolamento que, conforme apresentado anteriormente, depende das características estruturais e de superfície dos diferentes pavimentos, entre outros aspetos. Esta metodologia permite assim analisar e comparar os diferentes pavimentos no que concerne a custos, consumo de energia e emissões ao longo de todo o seu ciclo de vida. Esta é, portanto, uma ferramenta que poderá ser útil na fase de projeto de uma estrada e influenciar a escolha do tipo e das características do pavimento a adotar.

4.2.1. Descrição do sistema e suas limitações

De forma a corresponder ao objetivo definido anteriormente, isto é, incluir na presente metodologia todo o Ciclo de Vida da estrada em estudo, procurou-se incluir nesta todas as fases correspondentes ao referido ciclo. Conforme referido anteriormente, consideram-se cinco fases no ciclo de vida de um pavimento: (1) matérias-primas e produção; (2) construção; (3) uso; (4) conservação; (5) fim da vida. Estas fases estão, portanto, todas incluídas na metodologia desenvolvida, considerando-se em cada uma o seguinte:

1. Extração de materiais e produção: nesta fase são considerados todos os *inputs* e *outputs* do sistema, incluindo a extração e britagem de agregados, a produção de ligantes (cimento, betume ou emulsão betuminosa) e a produção de misturas (betuminosas ou hidráulicas). Além disso, são consideradas também todas as operações de transporte de materiais e misturas, tanto no local da obra e nas instalações de produção, como entre ambas, bem como as atividades e equipamentos necessários para o carregamento dos veículos utilizados no transporte.
2. Construção: nesta fase são consideradas as principais atividades necessárias para a construção da estrada, nomeadamente terraplenagens, reforço da fundação (quando necessário) e colocação das camadas do pavimento, considerando-se para o efeito as atividades específicas de cada tipo de pavimento (rígido, semi-rígido ou flexível).
3. Utilização: esta metodologia concentra uma parte significativa da atenção nesta fase, procurando considerar aspetos geralmente negligenciados pela maioria das metodologias existentes. Para tal, procura-se nesta fase avaliar o impacto no ciclo de vida da estrada, das

diferenças em termos de resistência ao rolamento e, por conseguinte, de consumo de energia e emissões libertadas, os quais dependem do tipo de pavimento e das suas características. Esta metodologia permite a introdução de diferenças de consumo de combustível, as quais podem ser obtidas experimentalmente, nomeadamente através do protótipo apresentado no capítulo seguinte.

4. Conservação: esta fase compreende as operações que serão efetuadas na estrada de forma a garantir que esta apresente as condições consideradas adequadas durante toda a sua vida. Dependendo da estratégia adotada pela administração rodoviária, poderão efetuar-se operações de conservação preventiva, mais simples, ou operações de reabilitação mais complexas, incluindo a substituição de camadas ou a sobreposição de novas camadas de pavimento.

5. Fim de vida: a última fase ocorre quando a estrada atinge o fim da sua vida útil (para a qual foi projetada). Mais uma vez, dependendo da estratégia adotada pela administração rodoviária, será possível proceder à sua recuperação (reconstrução), demolição e remoção dos materiais que ainda possam ser reciclados ou, simplesmente deixar a estrada no local, solução que também acarreta uma certa carga ambiental.

As interações entre as várias fases apresentadas acima e os fluxos de energia/materiais encontram-se representados esquematicamente na Figura 20.

Esta metodologia compreende, no entanto, algumas limitações. Uma delas tem a ver com os equipamentos utilizados durante as várias fases do ciclo de vida da estrada. Embora para cada atividade se tenham procurado fazer análises o mais completas possível, considerando os vários equipamentos necessários, só foram contabilizados os consumos de energia (geralmente combustível) e emissões libertadas durante a operação. Assim, os impactes imputáveis à construção, manutenção e fim de vida do equipamento não foram considerados.

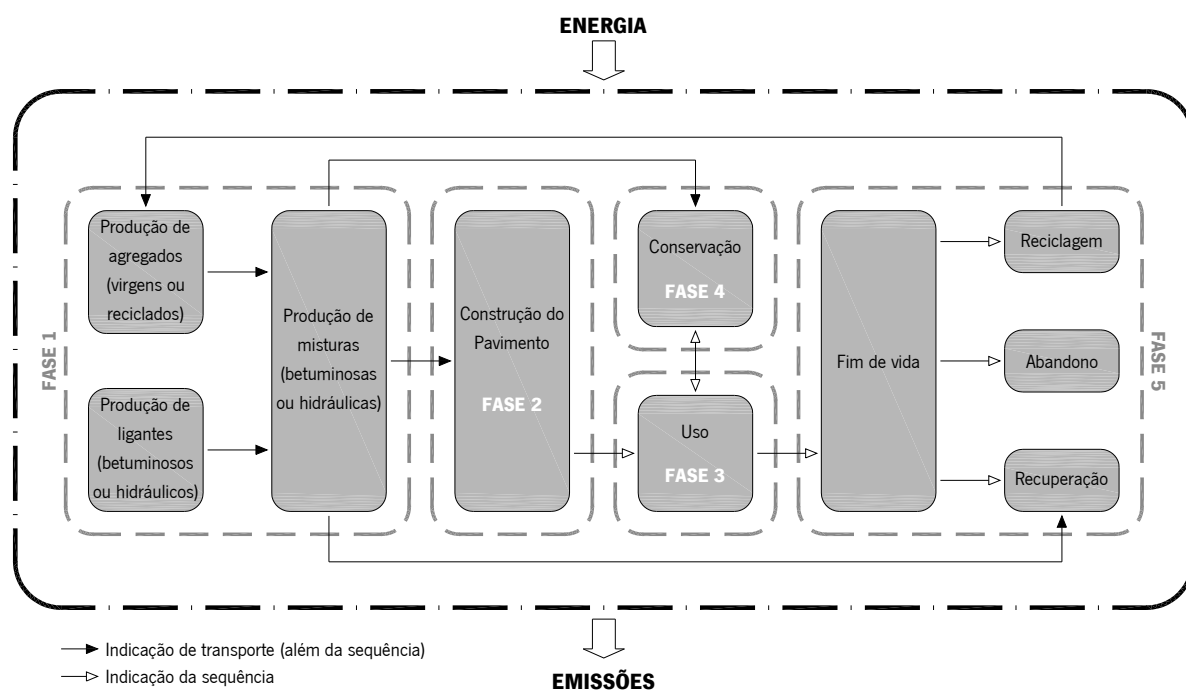


Figura 20 – Fluxos de energia/materiais e interações entre as fases do Ciclo de Vida dos pavimentos

4.2.2. Unidade funcional

A unidade funcional é uma unidade de referência e é comum a todas as avaliações do ciclo de vida feitas para o sistema em estudo, de modo a permitir que os resultados obtidos nos diferentes estudos, isto é, para diferentes soluções de pavimento, possam ser comparados. A unidade funcional dos pavimentos rodoviários é definida pela sua geometria, pela vida útil e pelos níveis de tráfego suportados (Vidal *et al.*, 2013). Para tal, de forma a comparar diferentes pavimentos, o comprimento e a largura da estrada devem ser os mesmos para todas as soluções, enquanto a espessura do pavimento pode variar, sendo determinada pelos métodos convencionais de dimensionamento (Capítulo 2), de modo a que todas as soluções analisadas sejam capazes de suportar o mesmo tráfego de projeto, e o dano existente nas diferentes estruturas no final da sua vida útil seja o mais próximo possível.

Esta noção de unidade funcional é fundamental, estando, no caso dos pavimentos rodoviários, dependente das características da estrada, do seu tempo de vida e do tráfego de projeto, pelo que a comparação entre soluções com unidades funcionais diferentes será difícil, se não mesmo impossível, de estabelecer.

4.3. Organização da metodologia

A metodologia desenvolvida encontra-se dividida em seis folhas de cálculo, de acordo com as seguintes designações: (1) Caracterização da estrada; (2) Caracterização dos materiais/misturas; (3) Caracterização dos equipamentos/processos; (4) Inventário do ciclo de vida; (5) Análise de custos; (6) Utilização da estrada. Procurou-se nessas seis folhas de cálculo incluir as diversas fases e componentes que constituem o ciclo de vida dos pavimentos rodoviários, de acordo com a descrição que a seguir se apresenta:

1. Caracterização da estrada: na primeira folha de cálculo é feita uma caracterização da estrada e do pavimento, incluindo as características geométricas, o tipo de pavimento a ser utilizado, o tipo e a espessura de cada camada do pavimento, bem como a indicação das distâncias médias de transporte dentro da obra, da central de produção e entre ambos, tendo em vista a posterior determinação dos impactes resultantes das operações de transporte. Nesta folha são ainda definidas e caracterizadas as atividades de conservação, manutenção e/ou reforço a implementar ao longo do ciclo de vida da estrada.
2. Caracterização dos materiais: na segunda folha de cálculo é feita uma caracterização dos materiais e das misturas, indicando-se a sua composição através da definição das percentagens (em massa) de cada componente, bem como as suas densidades (soltas e compactadas), as quais servirão de base para o cálculo do número de viagens a efetuar pelos camiões utilizados no transporte.
3. Caracterização dos equipamentos/processos: na terceira folha de cálculo procede-se à caracterização das diferentes atividades/processos, bem como do equipamento a ser utilizado, definindo-se os consumos unitários e as emissões para cada atividade que compõe o ciclo de vida.
4. Inventário do Ciclo de Vida (Life Cycle Inventory - LCI): a quarta folha de cálculo corresponde ao inventário, propriamente dito. Esta folha de cálculo é um dos principais *outputs* da metodologia, começando por apresentar um resumo das características da estrada e um mapa detalhado das quantidades de materiais e misturas necessárias, seguindo-se a apresentação

dos consumos e emissões resultantes de cada atividade, os quais são depois apresentados em termos globais e agrupadas por categorias de impacte para análise e comparação.

Uma das principais categorias de impacte a considerar nestas análises é o Potencial de Aquecimento Global (*Global Warming Potential - GWP*), o qual é determinado através da conversão de CO₂, CH₄ e N₂O em emissões de CO₂-equivalente, devido ao seu potencial para o efeito estufa, utilizando os fatores de conversão de 1, 23 e 296, respetivamente (Huang *et al.*, 2009b). Assim, o potencial de aquecimento global pode ser determinado através da Equação 8.

$$GWP = CO_2 + 23 CH_4 + 296 N_2O \quad (8)$$

O consumo de energia e as emissões gasosas resultantes dos equipamentos foram determinados com base nas Equações 9 e 10, respetivamente.

$$CTE = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (CUC_i \times FUCE_i \times V_j) \quad (9)$$

Onde CTE corresponde ao consumo total de energia (J); CUC_i ao consumo unitário de combustível do equipamento i (l/m³); $FUCE_i$ ao fator unitário de conversão em energia do combustível utilizado pelo equipamento i (J/l); e V_j ao volume de material/mistura j utilizado (m³).

$$ETL_{(g)} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (EUL_{(g)_i} \times CUC_i \times V_j) \quad (10)$$

Onde $ETL_{(g)}$ corresponde às emissões totais do gás g libertadas (kg); $EUL_{(g)_i}$ às emissões unitárias do gás g libertadas pelo equipamento i (kg/l); CUC_i ao consumo unitário de combustível do equipamento i (l/m³); e V_j ao volume de material/mistura j utilizado (m³).

5. Análise de Custos do Ciclo de Vida (Life Cycle Costs Analysis - LCCA): na quinta folha de cálculo procede-se a uma análise dos custos de cada alternativa, obtendo-se desta forma um

critério adicional para a seleção da solução mais adequada (além de impactes anteriormente considerados).

6. Análise da fase de utilização da estrada: a sexta e última folha de cálculo é a que pretende diferenciar esta metodologia da maior parte das outras já existentes, analisando a fase de utilização da estrada e quantificando os efeitos que resultam do tráfego. Para tal, procede-se a uma previsão do combustível consumido pelo tráfego de projeto (durante o tempo de vida da estrada), quantificando-se os seus custos e as emissões gasosas libertadas para a atmosfera durante a combustão do combustível. Caso existam dados experimentais que permitam estabelecer comparações ao nível do consumo de combustível entre pavimentos, esta folha de cálculo permite também determinar as diferenças de combustível consumido, bem como dos custos e emissões em comparação com um pavimento de referência. A determinação do consumo de combustível e das emissões gasosas libertadas para a atmosfera pelos veículos teve por base as Equações 11 e 12, respetivamente.

$$CTCV_{(y_0-y_n)} = \sum_{i=1}^m TMDAx_{i(y_0)} \times 365 \times \frac{(1+ct)^{n_y} - 1}{ct} \times CUCVx_i \times d \quad (11)$$

Onde $CTCV_{(y_0-y_n)}$ corresponde ao consumo total de combustível pelos veículos entre os anos 0 e n_y (l); $TMDAx_{i(y_0)}$ ao tráfego médio diário anual de veículos do tipo x_i no ano 0 (em que x corresponde a veículos ligeiros, pesados de mercadorias e pesados de passageiros); ct à taxa de crescimento do tráfego; n_y ao número de anos; $CUCVx_i$ ao consumo unitário de combustível dos veículos do tipo x_i (l/km); e d à distância média percorrida (km).

$$ETLV_{(g)(y_0-y_n)} = \sum_{i=1}^m TMDAx_{i(y_0)} \times 365 \times \frac{(1+ct)^{n_y} - 1}{ct} \times CUCVx_i \times EULVx_{i(g)} \times d \quad (12)$$

Onde $ETLV_{(g)(y_0-y_n)}$ corresponde às emissões totais do gás g libertadas pelos veículos entre os anos 0 e n_y (kg); $TMDAx_{i(y_0)}$ ao tráfego médio diário anual de veículos do tipo x_i no ano 0 (em que x corresponde a veículos ligeiros, pesados de mercadorias e pesados de passageiros); ct à taxa de crescimento do tráfego; n_y ao número de anos; $CUCVx_i$ ao consumo unitário de combustível dos veículos do tipo x_i (l/km); $EULVx_{i(g)}$ às emissões unitárias do gás g libertado pelos veículos de tipo x_i (kg/l); e d à distância média percorrida (km).

Em cada folha de cálculo foram considerados valores de referência, obtidos na literatura, os quais na ausência de outros indicados pelo utilizador, serão utilizados “por defeito” na realização dos diversos cálculos. Contudo, o utilizador tem a possibilidade de indicar outros que considere mais adequados em todos os campos utilizados (indicando, por exemplo, valores que tenha obtido experimentalmente, ou baseados em fontes mais recentes/atualizadas que sejam entretanto publicadas).

A título de exemplo apresenta-se na Figura 21 um excerto da parte inicial da primeira folha de cálculo, relativa à caracterização do pavimento.

ANÁLISE DO CICLO DE VIDA DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS		
1. TIPO DE PAVIMENTO		
Pavimento:	Flexível	
Período de vida:		anos
1.1. ESTRUTURA DO PAVIMENTO		
Camada 1	Betão Betuminoso Drenante	espessura: 0,05 m
Camada 2	Macadame Betuminoso	espessura: 0,06 m
Camada 3	Macadame Betuminoso	espessura: 0,07 m
Camada 4	Camada de Base Granular	espessura: 0,15 m
Camada 5	Camada de Sub-Base Granular	espessura: 0,15 m
Camada 6	N/a	espessura: m
Camada 7	N/a	espessura: m
Camada 8	N/a	espessura: m
1.2. CARACTERÍSTICAS DA ESTRADA		
1.2.1	Comprimento da estrada	1000 m
1.2.2	Número total de vias (nos 2 sentidos)	2
▶ caract estrada / caract misturas / caract processos / cons e emiss / análise custos / utilização		

Figura 21 – Excerto da primeira folha de cálculo da metodologia

Para as diferentes camadas que compõe o pavimento o utilizar poderá selecionar as misturas apresentadas no Quadro 6.

Quadro 6 – Misturas consideradas para a construção inicial do pavimento

Camada 1 (camada superficial)	Camadas 2 a 8 (camada restantes)
<ul style="list-style-type: none"> • Betão Betuminoso Drenante; • Betão Betuminoso Rugoso; • Betão Betuminoso em Camada de Desgaste; • Mistura Betuminosa de Alto Módulo; • Mistura Betuminosa Aberta com Borracha (MBA-BBA); • Mistura Betuminosa Rugosa com Borracha (MBR-BBA); • Laje de Betão; • Mistura genérica. 	<ul style="list-style-type: none"> • Betão Betuminoso em Camada de Regularização; • Mistura Betuminosa de Alto Módulo; • Mistura Betuminosa Aberta com Borracha (MBA-BBA); • Mistura Betuminosa Rugosa com Borracha (MBR-BBA); • Macadame Betuminoso; • Macadame Betuminoso c/RAP; • ABGE tratado c/ Emulsão Betuminosa; • Mistura Betuminosa Aberta a Frio; • Camada de Base Granular; • Camada de Sub-Base Granular; • Laje de Betão; • Betão Pobre; • Agregado de Granulometria Extensa Estabilizado com Cimento; • Solo-Cimento; • Mistura genérica.

As características das diferentes misturas, nomeadamente a sua composição, encontram-se previamente definidas, tendo sido considerados valores usualmente utilizados para cada uma dessas misturas. Contudo, à semelhança dos restantes campos que compõe a metodologia, o utilizador tem a possibilidade de indicar outros valores que melhor se adequem à situação em análise. Para além disso, e porque as opções disponibilizadas para a escolha do tipo de mistura a utilizar nas diversas camadas, não contemplam a totalidade de misturas existentes, o utilizador pode ainda indicar a utilização de uma “mistura genérica”, indicando de seguida as suas características e composição.

Quanto às atividades consideradas, procurou-se efetuar uma análise o mais completa possível, tendo estas sido divididas em 4 categorias:

- Transporte (englobando-se neste item todos os transportes necessários, nomeadamente de materiais, misturas e material resultante de fresagem);
- Obtenção de matérias-primas (tendo sido considerada a extração de areia, britagem de agregados, produção de ligantes hidráulicos e betuminosos e o carregamento dos materiais referidos);
- Produção das misturas (considerando-se aqui todos os custos e emissões imputáveis à produção das misturas consideradas, nomeadamente misturas betuminosas produzidas a quente e a frio e misturas hidráulicas);
- Construção (a qual engloba a aplicação de regas de colagem, compactação de solos e misturas, a pavimentação propriamente dita, colocação/pintura de sinalização horizontal, e alguns trabalhos específicos de cada pavimento, como por exemplo a serração e vedação de juntas nos pavimentos rígidos).

4.4. Valores unitários (consumos e emissões)

Conforme referido anteriormente, em cada campo são indicados valores de referência provenientes da bibliografia, sendo simultaneamente dada a possibilidade de o utilizador indicar outros que considere mais adequados para o caso em estudo (Figura 22). Caso o utilizador indique outros valores (nos campos sombreados a cinzento), serão esses os utilizados nos cálculos, caso contrário, serão utilizados “por defeito” os valores de referência.

3.2. CONSUMOS E EMISSÕES DO CARREGAMENTO DO MATERIAL GRANULAR					
3.2.1	Consumo de energia		MJ/m ³	2,40 MJ/m ³	[1]
3.2.2	Emissões CO ₂		g/m ³	1,90E+02 g/m ³	[1]
3.2.3	Emissões CH ₄		g/m ³	1,20E-04 g/m ³	[1]
3.2.4	Emissões N ₂ O		g/m ³	3,83E-03 g/m ³	[1]
3.2.5	Emissões SO ₂		g/m ³	9,11E-02 g/m ³	[1]
3.2.6	Emissões NO _x		g/m ³	1,71E+00 g/m ³	[1]
3.3. CONSUMOS E EMISSÕES DO CILINDRO NA COMPACTAÇÃO DE SOLOS					
3.3.1	Consumo de energia		MJ/m ²	0,5845 MJ/m ²	[1]
3.3.2	Emissões CO ₂		g/m ²	4,62E+01 g/m ²	[1]
3.3.3	Emissões CH ₄		g/m ²	2,92E-05 g/m ²	[1]
3.3.4	Emissões N ₂ O		g/m ²	9,37E-04 g/m ²	[1]
3.3.5	Emissões SO ₂		g/m ²	2,22E-02 g/m ²	[1]
3.3.6	Emissões NO _x		g/m ²	4,18E-01 g/m ²	[1]
3.4. CONSUMOS E EMISSÕES DAS PAVIMENTADORAS ASFÁLTICAS					
3.4.1	Consumo de energia		MJ/m ²	0,648 MJ/m ²	[1]
3.4.2	Emissões CO ₂		g/m ²	5,12E+01 g/m ²	[1]
▶ ▶ caract estrada < caract misturas < caract processos < cons e emiss < análise custos < utilizac					

Figura 22 – Excerto da caracterização dos processos, com indicação dos consumos e emissões unitários

Para as diversas atividades foram considerados o consumo de energia e as emissões de Dióxido de Carbono (CO₂), Metano (CH₄), Óxido Nitroso (N₂O), Dióxido de Enxofre (SO₂) e Óxidos de Azoto (NO_x), sendo os valores de referência utilizados provenientes na sua maioria de Stripple (2001), White *et al.* (2010) e Vidal *et al.* (2013).

4.5. Estratégias de conservação e reabilitação

Após a sua construção, é normal que os pavimentos vão sofrendo uma degradação progressiva ao longo do tempo, por ação do tráfego e das condições climatéricas, o que levará a uma diminuição da sua qualidade estrutural e funcional. Assim, torna-se imprescindível a adoção de determinadas estratégias com vista à conservação da qualidade oferecida pela estrada. Essas estratégias podem adotar um cariz mais preventivo, passando por intervenções mais frequentes e, portanto, de menor dimensão, ou adotar um caráter mais esporádico, ocorrendo as intervenções quando o pavimento atinge um estado de degradação bastante elevado, o que obrigará a intervenções mais complexas e

dispendiosas. A definição das estratégias de conservação a adotar ao longo do ciclo de vida reveste-se assim da maior importância. De acordo com Chehovits e Galehouse (2010), os tratamentos preventivos permitem reduzir significativamente o uso de energia e as emissões de gases com efeito de estufa em comparação com as estratégias de reabilitação e reconstrução tradicionais.

Na presente metodologia o utilizador tem a possibilidade indicar até 10 intervenções ao longo do período de vida útil da estrada (Figura 23), as quais podem variar entre a reciclagem de parte do pavimento existente, a fresagem de parte do pavimento e colocação de novas camadas ou a simples sobreposição de novas camadas ao pavimento existente.

Figura 23 – Excerto da secção relativa às atividades de conservação, manutenção e/ou reforço

No que respeita a atividades que compreendam fresagem e/ou reciclagem do pavimento existente, a metodologia considera as seguintes opções:

- Reciclagem de camadas em betão, *in situ* com cimento;
- Fresagem de camadas em betão e transporte para depósito;
- Fresagem de camadas em betão (transporte imputável a outra obra);
- Reciclagem de camadas betuminosas, *in situ* com ligante betuminoso;

- Reciclagem de camadas betuminosas, *in situ* com cimento;
- Fresagem de camadas betuminosas e reciclagem em central;
- Fresagem de camadas betuminosas e transporte para depósito;
- Fresagem de camadas betuminosas (transporte imputável a outra obra).

Relativamente à colocação de novas camadas, existem diferentes possibilidades para cada uma, as quais dependem da sua posição no pavimento, de acordo com o especificado no Quadro 7.

Quadro 7 – Misturas consideradas para as atividades de conservação, manutenção e/ou reforço

Camada 1 (camada superficial)	Camada 2 (camada intermédia)	Camada 3 (camada inferior)
<ul style="list-style-type: none"> • Betão Betuminoso Drenante; • Betão Betuminoso Rugoso; • Betão Betuminoso em Camada de Desgaste; • Mistura Betuminosa de Alto Módulo; • Mistura Betuminosa Aberta com Borracha (MBA-BBA); • Mistura Betuminosa Rugosa com Borracha (MBR-BBA); • Microaglomerado Betuminoso a Frio; • Revestimento Superficial; • Microbetão Betuminoso Rugoso; • Betão Betuminoso Muito Delgado; • Laje de Betão; • Mistura reciclada genérica; • Mistura genérica. 	<ul style="list-style-type: none"> • Betão Betuminoso em Camada de Regularização; • Macadame Betuminoso; • Macadame Betuminoso c/RAP; • Laje de Betão; • Betão Pobre; • Mistura genérica. 	<ul style="list-style-type: none"> • Macadame Betuminoso; • Macadame Betuminoso c/RAP; • Laje de Betão; • Betão Pobre; • Mistura genérica.

À semelhança das misturas utilizadas na construção inicial, o utilizador pode também indicar a utilização de uma “mistura genérica” (caso a mistura pretendida não esteja contemplada nas restantes opções), indicando as suas características e composição.

4.6. Apresentação dos resultados da metodologia desenvolvida

Conforme referido anteriormente, para cada atividade foram considerados o consumo de energia e as emissões de Dióxido de Carbono (CO₂), Metano (CH₄), Óxido Nitroso (N₂O), Dióxido de Enxofre (SO₂) e Óxidos de Azoto (NO_x), os três primeiros devido ao seu Potencial de Aquecimento Global (GWP) e os outros dois devido à sua contribuição para a produção de chuvas ácidas. Assim, os resultados são primeiro apresentados para as operações de construção inicial e depois para as operações relativas à conservação, manutenção e/ou reforço, sendo por fim apresentados os resultados globais, os quais incluem os consumos e emissões desses dois conjuntos de atividades.

Para cada uma das situações referidas, os resultados são ainda apresentados em termos totais e divididos nas 4 categorias apresentadas no final da secção 4.3 (transporte, obtenção de matérias-primas, produção de misturas e construção).

Para as atividades de construção inicial e para as relativas à conservação, manutenção e/ou reforço, bem como para o total (soma de ambas), procede-se ainda à determinação do Potencial de Aquecimento Global (GWP), através da Equação 8.

Em termos de análise de custos, os resultados são também apresentados inicialmente de forma mais pormenorizada para cada atividade/mistura, sendo depois agrupados por tipos de misturas. Também relativamente aos custos se estabelece a distinção entre os relativos à construção inicial e os relativos à conservação, manutenção e/ou reforço, sendo por fim apresentado o custo total.

Relativamente à utilização da estrada, procede-se primeiro à quantificação do consumo de combustível imputável ao tráfego de projeto, com a conseqüente estimativa do custo (do combustível) e das emissões produzidas. Caso se disponham de dados que permitam estabelecer diferenças de consumo de combustível nos diferentes pavimentos, é de seguida estimada a poupança ao longo do período de vida da estrada, tanto em termos económicos como em termos ambientais (emissões libertadas para a atmosfera). Os consumos de combustível e conseqüentes emissões são sempre apresentados por tipo de veículo (ligeiros, pesados de mercadorias e pesados de passageiros) seguidos dos valores totais.

CAPÍTULO 5

DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO PARA AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO ROLAMENTO

5.1. Objetivo

O desenvolvimento do protótipo teve como objetivo a obtenção de um equipamento que, comparativamente a outros já existentes, e que foram apresentados no Capítulo 3, possuísse dimensões relativamente reduzidas, fosse transportável de forma a permitir a realização de ensaios *in situ*, pudesse ser obtido a um custo relativamente baixo, e permitisse avaliar a resistência ao rolamento oferecida pela circulação sobre diferentes superfícies de pavimentos. Dessa forma seria possível obter-se as diferenças de consumo de energia imputáveis à circulação em cada uma das superfícies estudadas e estimar as diferenças de consumo de combustível pelos veículos que circulam nas estradas, permitindo uma avaliação da sustentabilidade de diferentes soluções de pavimentação ao longo do seu ciclo de vida, com particular atenção para os custos de operação atribuídos aos utentes.

5.2. Breve descrição do equipamento

De forma a assegurar a portabilidade do equipamento, optou-se pela sua construção em diversos módulos facilmente desmontáveis. Desta forma, é possível o seu transporte numa carrinha, sem obrigar ao recurso a outros meios, nomeadamente atrelados, permitindo ainda a sua fácil e rápida instalação no local.

De uma forma geral, este equipamento é constituído por um elemento central (veio), o qual garante a fixação do protótipo ao pavimento, e 2 braços simétricos dotados de rodas nas extremidades exteriores. Uma das rodas (roda motriz) tem acoplado um motor, o qual garante o movimento circular do equipamento em torno do elemento central.

Acoplado ao veio central está ainda um terceiro braço, perpendicular aos outros dois que suportam as rodas, dotado de um laser para avaliação da macrotextura do pavimento.

No topo do veio central existe um sistema de anéis deslizantes (*"slip rings"*, na nomenclatura Anglo-saxónica), o qual assegura o fornecimento de energia ao motor e a transmissão de dados entre este e o computador, localizado fora do perímetro de rodagem do equipamento, sendo essa ligação estabelecida através de um pórtico concebido para o efeito, conforme se pode visualizar na Figura 24.

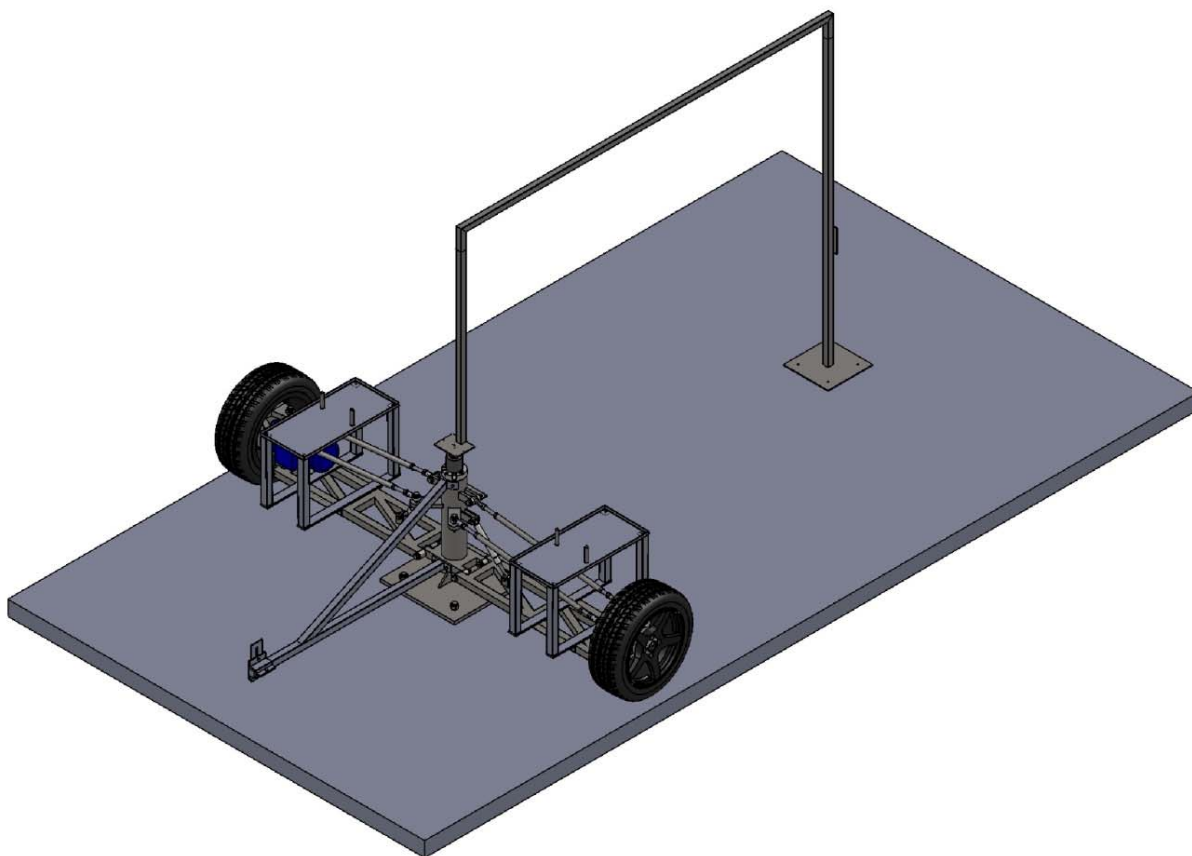
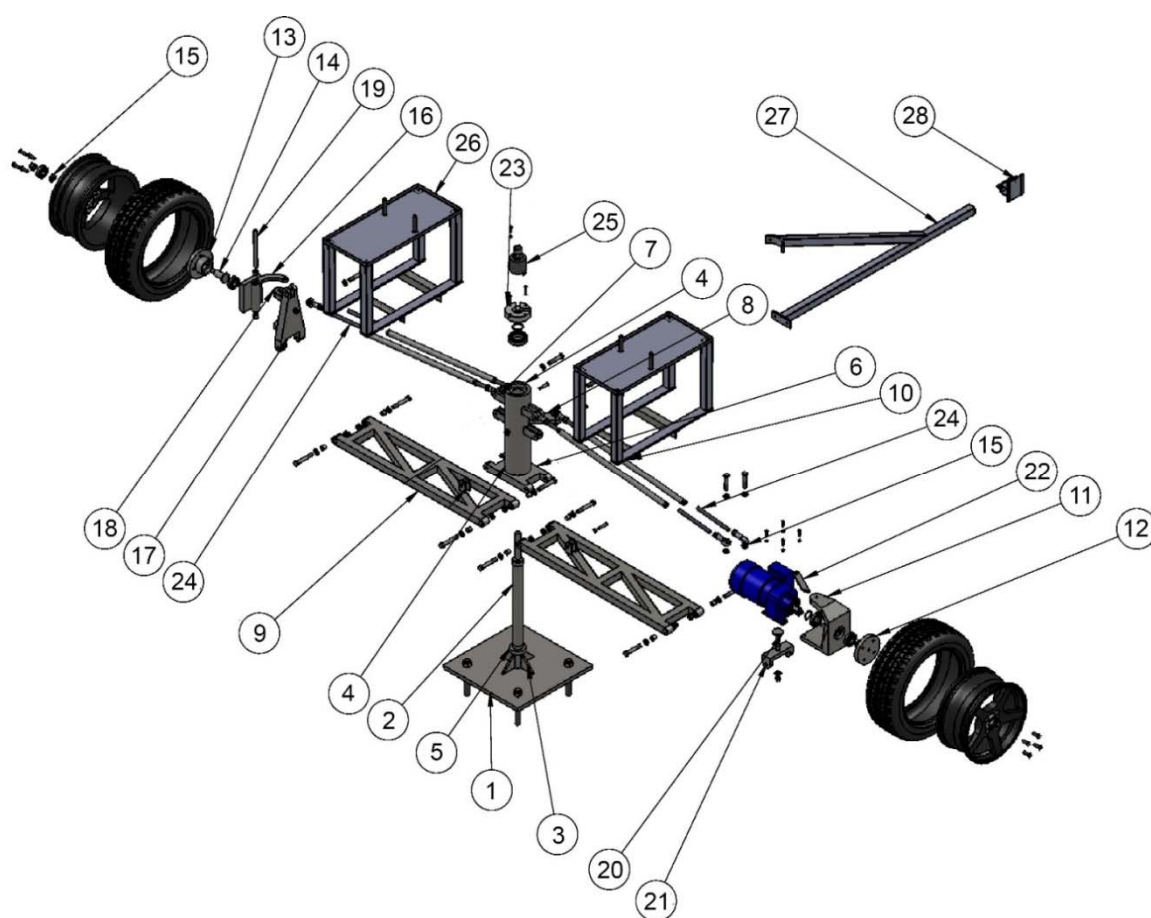


Figura 24 – Protótipo construído para avaliação da resistência ao rolamento

5.3. Características técnicas e geométricas

Conforme referido na secção anterior, a fixação do equipamento ao solo é garantida pelo veio central. Essa fixação é materializada por uma sapata metálica aparafusada ao pavimento através de 4 parafusos sextavados com rosca total com 16 milímetros de diâmetro (M16). O veio central (que permanece estático por estar fixo à sapata) está envolto por uma “camisa de rotação” a qual gira solidariamente com os braços e as rodas. Os braços são constituídos por módulos metálicos, os quais, juntamente com as diversas componentes de ligação apresentadas na Figura 25, perfazem um raio de 1,25 metros (entre o eixo de rotação e o centro das rodas).



Legenda:

1 - Sapata; 2 - Veio central; 3 - Reforço fixação; 4 - Camisa de rotação; 5 - Batente; 6 - Eixo do braço inferior; 7 - Eixo do braço superior; 8 - Eixo do braço da direção; 9 - Braço inferior; 10 - Braço de direção; 11 - Suporte para motor; 12 - Disco da roda motora; 13 - Disco da roda não motora; 14 - Veio da roda não motora; 15 - Anel de encosto; 16 - Suporte da roda não motora; 17 - Suporte do eixo da roda não motora; 18 - Chapa de fixação do veio; 19 - Veio de suporte da roda não motora; 20 - Veio da roda motora; 21 - Suporte para rotação; 22 - Eixo para rotação da roda motora; 23 - Suporte para fixação de coletor; 24 - Varão roscado; 25 - Anéis deslizantes; 26 - Suporte de pesos; 27 - Braço de suporte para laser; 28 - Suporte para laser

Figura 25 – Constituição do protótipo para avaliação da resistência ao rolamento

Os braços encontram-se ligados ao elemento central através de rótulas, de forma a garantir o contacto permanente entre as rodas e o pavimento e eliminar efeitos indesejados que poderiam ocorrer devido a desnivelamentos do pavimento. As rodas são direcionáveis, permitindo os braços superiores dotá-las de uma inclinação até 5° relativamente à trajetória normal, através do ajustamento de varões roscados. A velocidade é variável, podendo atingir um máximo de 20 km/h.

Na elaboração do projeto do protótipo optou-se pela colocação de duas rodas simétricas, e não apenas uma, de forma a eliminar a influência de eventuais inclinações do pavimento no esforço de torque registado durante os movimentos ascendente e descendente dessa roda. Além disso, o facto de existirem duas rodas simétricas permite equilibrar os esforços exercidos sobre o eixo central e “neutralizar” o efeito da aceleração centrífuga, o qual, caso existisse apenas uma roda, seria significativo, dado o raio de curvatura ser bastante pequeno. Optou-se ainda pela colocação do motor junto a uma das rodas, e não no veio central, de forma a evitar o efeito de variáveis que não estejam relacionadas com a circulação em si, minimizando o seu efeito no esforço de torque registado. Consequentemente, junto à roda não motriz, colocou-se um peso adicional de forma a equilibrar o equipamento, isto é, eliminar o efeito que o peso do motor poderia ter no esforço de torque registado em situações de diferentes sentidos de movimento (ascendente e descendente) da roda sujeita a uma maior carga, nas situações em que o pavimento possua inclinação.

Sobre os braços inferiores, junto a cada uma das rodas, colocou-se ainda uma base sobre a qual poderão ser colocados diferentes pesos, permitindo desta forma simular diferentes cargas a atuar sobre as rodas. Caso não sejam colocadas cargas adicionais, isto é, nos casos em que a carga a atuar sobre as rodas é apenas devida ao peso próprio do equipamento, o peso que cada roda suporta é de 700 N. Cada placa metálica que se coloque sobre o respetivo suporte provocará um aumento da carga sobre essa roda de 60 N.

Os pneus escolhidos, designados pela nomenclatura 195/50 R 15 82V, são pneus comuns, disponíveis no mercado e utilizados por diversos modelos de automóveis, bem como as jantes de 15 polegadas. Esta escolha foi feita com base num estudo de mercado, para que estes representassem o melhor possível a generalidade das características das rodas dos veículos que utilizam as nossas estradas.

5.4. Transmissão de dados

Com o presente equipamento pretende-se obter dados que permitam estabelecer diferenças de resistência ao rolamento devido às diferentes características superficiais dos vários pavimentos. A transmissão de dados e energia elétrica entre os cabos que giram solidários com as rodas e os braços, e os cabos superiores que permanecem estáticos (fixos ao pórtico), é assegurada, sem que estes se enrolem devido ao movimento circular contínuo do equipamento, por um sistema de anéis deslizantes (Figura 26).

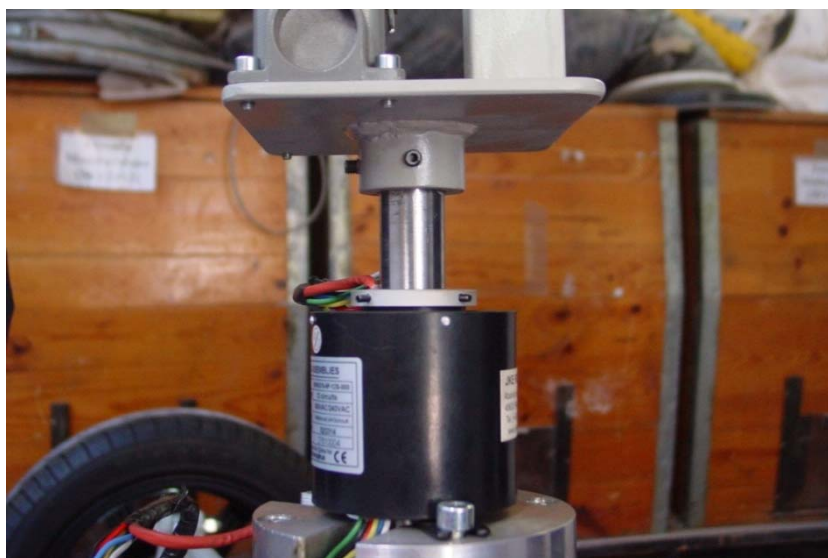


Figura 26 – Anéis deslizantes para transmissão de dados e energia ao motor

As diferenças em termos de resistência ao rolamento que se pretendem estabelecer, basear-se-ão no esforço de torque medido pelo variador de frequência que está acoplado ao motor e no consumo de energia registado por um multímetro.

5.5. Calibração do equipamento

De forma a calibrar o equipamento, para aferir a validade dos resultados e definir os procedimentos a adotar para a realização dos ensaios, procedeu-se a uma série de ensaios preliminares. Pretendeu-se desta forma averiguar até que ponto determinadas variáveis, como o tempo de rolamento ou eventuais inclinações das rodas, poderiam ou não influenciar os valores registados para o esforço de torque, o qual poderá ser utilizado como medida indireta da resistência ao rolamento.

Apresenta-se de seguida uma descrição mais pormenorizada de cada uma das variáveis estudadas, bem como os principais resultados e conclusões obtidas.

5.5.1. Comparação do esforço de torque com o consumo de energia

De forma a avaliar-se a validade dos resultados obtidos, procedeu-se simultaneamente ao seu registo sob duas formas diferentes:

- registo do esforço de torque a que o motor é sujeito, para que o equipamento se movimente a determinada velocidade, sobre determinada superfície de pavimento;
- registo da energia consumida pelo equipamento para que este se movimente sobre a superfície em estudo, à velocidade pretendida.

Relativamente à obtenção do esforço de torque, esta é realizada com recurso a uma das funções disponibilizadas pelo variador de frequência acoplado ao motor. O variador de frequência envia esses dados para o computador, os quais são monitorizados e guardados através de uma aplicação desenvolvida para o efeito em LabVIEW, o qual controla também o funcionamento do equipamento (Figura 27).

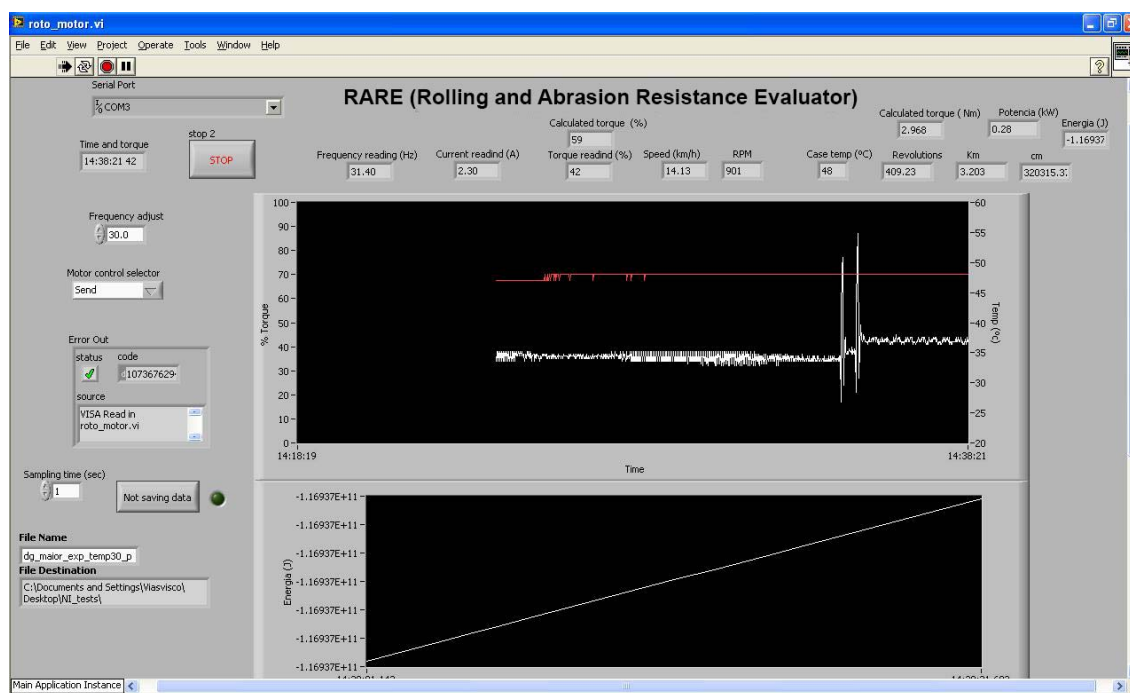


Figura 27 – Painel frontal da aplicação desenvolvida para monitorização do esforço de torque e controlo do funcionamento do equipamento

A medição do consumo de energia durante os ensaios obrigou à instalação de um multímetro (Figura 28) e de uma placa de aquisição de dados. Antes de ser fornecida ao motor do equipamento, a energia passa pelo multímetro, o qual mede a sua tensão e intensidade, enviando esses dados para a placa de aquisição que por sua vez os transmite ao computador. Na Figura 29 apresenta-se um esquema do emparelhamento destes equipamentos utilizados para a medição do consumo de energia.



Figura 28 – Multímetro utilizado para medição do consumo de energia

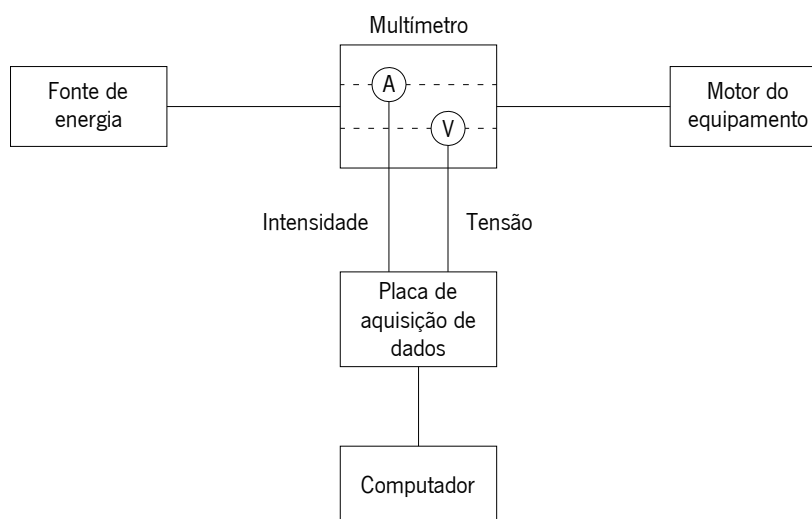


Figura 29 – Esquema do emparelhamento dos equipamentos utilizados para medição do consumo de energia

A monitorização do consumo de energia é efetuada com recurso a outra aplicação desenvolvida também em LabVIEW (Figura 30).



Figura 30 – Painel frontal da aplicação desenvolvida para monitorização do consumo de energia

Na referida aplicação é possível visualizar em tempo real a intensidade e a tensão da corrente e é calculado o integral da energia consumida desde o início do movimento do equipamento (gráfico do canto inferior esquerdo da Figura 30). Essa energia é depois dividida pelo tempo, sendo esses valores (em J/s) os utilizados para efeitos de comparação de diferentes pavimentos.

Embora esforço de torque e resistência ao rolamento sejam conceitos diferentes, e possam ser condicionados por outros fatores, será de se esperar uma certa dependência do primeiro relativamente ao segundo. O registo do consumo de energia ocorrido nesses mesmos ensaios permite estabelecer relações entre o esforço de torque e o consumo de energia e definir as proporções em que estas se relacionam, de forma análoga à realizada por outros autores e apresentada no Capítulo 3, nomeadamente nos Quadros 2 e 3.

A comparação dos resultados do consumo de energia e do esforço de torque, obtidos para os mesmos ensaios, mostra existirem tendências semelhantes e consistentes (Figura 31). O consumo de energia e o esforço de torque não variam ao longo do tempo nas mesmas proporções, isto é, a variação percentual do esforço de torque é superior à variação que ocorre em termos de consumo de energia, estando, portanto, de acordo os estudos apresentados na secção 3.4.4, em que a resistência ao rolamento e o consumo de combustível também não variam nas mesmas proporções.

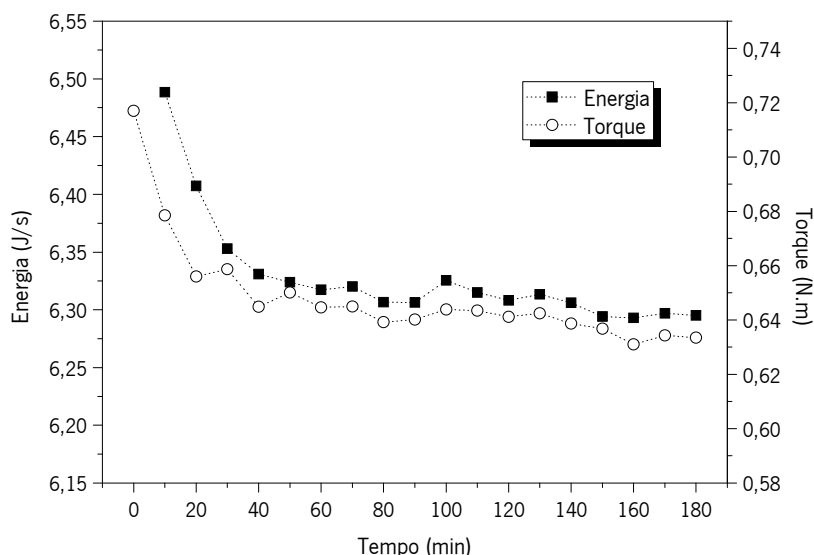


Figura 31 – Comparação do esforço de torque e do consumo de energia registados para o mesmo ensaio

Tendo em conta que cada valor apresentado na Figura 31 representa a média dos valores medidos nos 10 minutos anteriores e comparando os valores obtidos no início do ensaio com a média dos valores registados a partir do momento em que deixam de se verificar diferenças superiores a 1% face ao valor anterior, isto é, após o esforço de torque e o consumo de energia terem estabilizado, conclui-se ter existido, para o exemplo apresentado, uma diminuição de 5,74% do esforço de torque e uma diminuição de 2,79% do consumo de energia. Conclui-se desta forma que, neste caso, uma variação (em percentagem) do esforço de torque se traduzirá numa variação do consumo de energia de apenas 51,39% desse valor. Esta tendência verificou-se para os diversos ensaios realizados, situando-se a relação entre as variações do esforço de torque e do consumo de energia entre os 50 e os 60%.

5.5.2. Inclinação das rodas

Conforme referido anteriormente, ambas as rodas são ligeiramente direcionáveis, podendo ser dotadas de uma inclinação de até 5° relativamente à trajetória normal (perpendicular aos braços do equipamento). A inclusão de varões roscados, os quais permitem a alteração da inclinação das rodas, teve como objetivo salvaguardar a possibilidade de no futuro se realizarem ensaios com maior atrito entre o pneu e o pavimento através desse “desvio” da orientação da roda face à trajetória do movimento, mas também a possibilidade de se averiguar se, dado o protótipo realizar um movimento circular contínuo com um raio relativamente reduzido (1,25 metros), seria, sob o ponto de vista do

consumo de energia e, conseqüentemente, da resistência ao rolamento, mais vantajosa a realização dos ensaios com um determinado ângulo, de forma a minimizar o esforço tangencial exercido pelos pneus no pavimento uma vez que as rodas não descrevem uma trajetória retilínea.

De forma a determinar a posição das rodas que impunha um menor esforço de torque, realizaram-se 5 ensaios, dotando as rodas de diferentes inclinações para o interior, face à posição normal que seria a perpendicular aos braços do equipamento. Conforme demonstrado na Figura 32, a posição que conduz a um menor esforço de torque é a posição perpendicular aos braços, isto é, aquela em que as rodas não possuem qualquer inclinação.

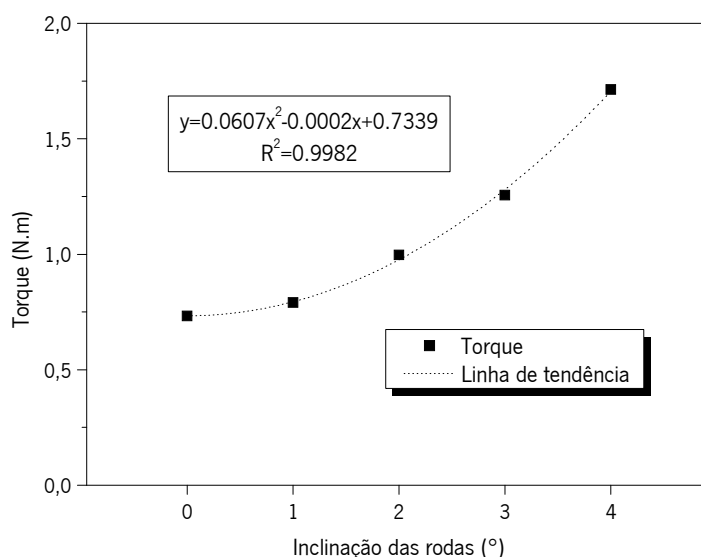


Figura 32 – Esforço de torque obtido para as diferentes inclinações das rodas face à trajetória normal

Concluiu-se desta forma que os ensaios deverão ser realizados com as rodas na posição perpendicular aos braços, sem qualquer inclinação face à tangente da trajetória circular do movimento descrito pelo equipamento, de forma a reduzir a quantidade de variáveis externas a influenciarem os valores de torque e energia registados nos ensaios.

5.5.3. Tempo de rolamento

Após o início do movimento dos veículos, a temperatura dos pneus vai aumentando, acabando depois por estabilizar. À medida que a temperatura dos pneus vai aumentando, verifica-se uma tendência inversa na resistência ao rolamento, isto é, esta vai diminuindo. Embora a estabilização da temperatura dos pneus, e conseqüentemente da resistência ao rolamento, seja bastante demorada, há um

momento a partir do qual se considera que a influência na resistência ao rolamento é negligenciável. A Norma ISO 18164 (2005), que define os métodos de medição da resistência ao rolamento dos pneus, refere que, para veículos ligeiros, esse momento ocorre após 30 minutos de rolamento (conforme demonstrado na Figura 33) sob determinadas condições, nomeadamente:

- Temperatura: 25°C;
- Pressão nos pneus: 2,1 bars;
- Carga: 80% da capacidade máxima dos pneus;
- Velocidade: 80 km/h.

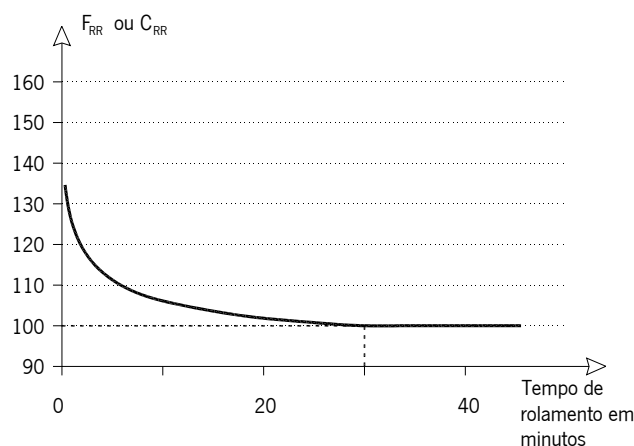


Figura 33 – Resistência ao rolamento medida nas condições definidas pela norma ISO 18164 (adaptado de Michelin (2003))

Assim, a referida norma recomenda o rolamento durante pelo menos 30 minutos antes de efetuar a primeira medição de resistência ao rolamento e, caso se pretenda efetuar medições a velocidades diferentes, recomenda um funcionamento à nova velocidade durante pelo menos 20 minutos antes de efetuar as medições. Para veículos pesados, o tempo necessário para a estabilização da temperatura das rodas e, conseqüentemente, da resistência ao rolamento é maior (cerca de 3 horas para se atingir a estabilização completa), recomendando a norma um período de aquecimento de pelo menos 90 minutos antes da primeira medição e pelo menos 30 minutos antes de medições a velocidades diferentes.

Uma vez que as condições acima referidas, definidas pela Norma ISO 18164 (2005), para determinação da resistência ao rolamento em veículos ligeiros, não podem ser totalmente respeitadas nos ensaios realizados com o protótipo desenvolvido, uma vez que a carga imposta às rodas é relativamente baixa, assim como a velocidade máxima de circulação (20 km/h) que fica bastante

aquém dos 80 km/h preconizados pela norma, procedeu-se a alguns ensaios com vista à determinação do tempo necessário à estabilização do esforço de torque e, conseqüentemente, da resistência ao rolamento.

Na sequência dos ensaios realizados conclui-se que a estabilização do esforço de torque ocorre a partir dos 90 minutos a velocidades entre os 5 e os 20 km/h, e os pneus sujeitos a uma pressão de 2,1 bar, conforme demonstram, a título de exemplo, as Figuras 34 e 35, relativas a cargas de 700 N e de 1000 N, respetivamente, a atuar sobre cada roda.

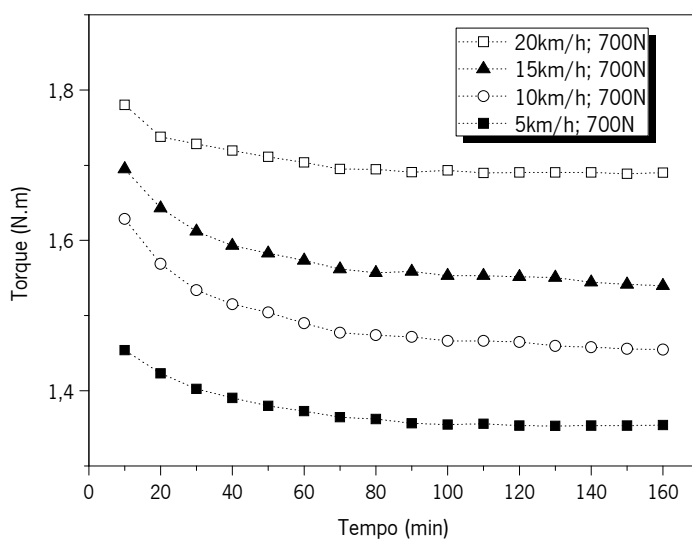


Figura 34 – Evolução do esforço de torque ao longo do tempo em ensaios com carga de 700N a atuar sobre cada roda

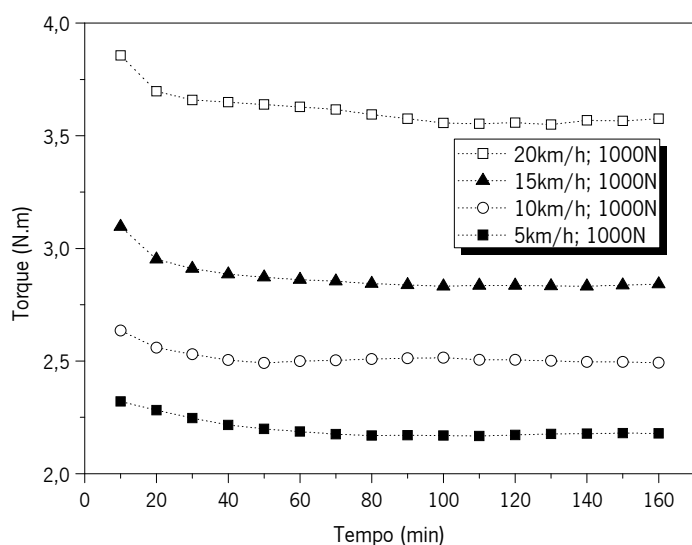


Figura 35 – Evolução do esforço de torque ao longo do tempo em ensaios com carga de 1000N a atuar sobre cada roda

De realçar também o facto de a estabilização ocorrer mais depressa para cargas ou velocidades mais elevadas. De facto, ao circularem a maior velocidade ou mais carregados, os pneus aquecem mais depressa, reduzindo a resistência ao rolamento mais rapidamente. Enquanto na Figura 34, em que existe uma carga de 700 N a atuar em cada roda, são necessários os 90 minutos para que o esforço de torque estabilize, na Figura 35, em que existe uma carga de 1000 N a atuar em cada roda, já se poderia considerar ter ocorrido a estabilização aos 60 minutos.

5.6. Procedimentos de ensaio a adotar

Com base nas análises anteriormente apresentadas, definiu-se um conjunto de procedimentos a adotar na realização dos diferentes ensaios, de forma a garantir que estes são realizados sob as mesmas condições (ou pelo menos minimizando as diferenças entre si), permitindo assim estabelecer comparações válidas para aferir a influência das superfícies a ensaiar nas variáveis em estudo (torque e energia) e, conseqüentemente, na resistência ao rolamento.

Assim sendo, na realização de cada ensaio com o protótipo desenvolvido, deverão atender-se as seguintes condições:

1. Antes de colocar o equipamento em funcionamento deverá verificar-se a pressão dos pneus e a posição das rodas (que deverão fazer um ângulo de 90° com os braços do equipamento, com exceção de ensaios específicos em que se pretenda dotar as rodas de determinada inclinação relativamente à tangente da trajetória descrita) para que não existam diferenças que possam condicionar a comparação dos diferentes resultados;
2. O utilizador poderá definir a velocidade de circulação, não devendo esta, por razões de segurança e de estabilidade do equipamento, ultrapassar os 20 km/h;
3. O equipamento deve ser colocado em funcionamento durante 90 minutos à velocidade pretendida, de forma a estabilizar o esforço de torque e, conseqüentemente, o consumo de energia, devendo as medições, para efeitos de comparação da resistência ao rolamento dos diferentes pavimentos, realizar-se apenas após esse período;
4. Nos casos em que se pretenda realizar ensaios a diferentes velocidades ou com diferentes cargas, deverá aguardar-se, após a respetiva alteração, o tempo necessário a que, uma vez mais, o esforço de torque e o consumo de energia estabilizem. Na sequência dos ensaios

realizados poderá sugerir-se, como critério de estabilização, que o esforço de torque ou o consumo de energia não apresentem uma variação superior a 1% durante 10 minutos.

5.7. Desenvolvimentos futuros

Em fase de projeto pretendeu-se que o protótipo fosse o mais versátil possível e permitisse a sua utilização para outros fins. Assim, o facto de as rodas serem direccionáveis, às quais poderá ser imposta uma inclinação de até 5° relativamente à trajetória circular normal, deverá permitir estudar a resistência à desagregação de diferentes misturas betuminosas (principalmente as abertas). Para tal, poderão utilizar-se as rodas normais, impondo-lhes apenas a referida inclinação, ou substituí-las por rodas pitonadas (*studded tires*).

CAPÍTULO 6

CARACTERIZAÇÃO DAS SUPERFÍCIES DOS TRECHOS E DAS MISTURAS A UTILIZAR NO ESTUDO DOS PAVIMENTOS

6.1. Introdução

Nesta fase do trabalho procedeu-se à construção de trechos experimentais com diferentes superfícies para realização de ensaios de avaliação da resistência ao rolamento, determinada através do consumo energético e do torque, com o protótipo apresentado no Capítulo 5. Assim, considerou-se fundamental a caracterização superficial das diferentes superfícies dos trechos estudadas com o protótipo, de forma a ser possível relacionar essas características com os resultados da medição da resistência ao rolamento.

Nesse sentido, foram caracterizadas quatro superfícies de pavimentos diferentes, as quais se tentou que fossem suficientemente abrangentes para que se pudesse estudar no protótipo a resistência ao rolamento sobre pavimentos com características superficiais variadas. Com estes estudos pretendeu-se, sobretudo, desenvolver e calibrar um modelo, recorrendo a técnicas de *Data Mining* (Capítulo 7), que permitisse relacionar a resistência ao rolamento, através dos parâmetros medidos pelo protótipo (esforço de torque e consumo de energia), com as características superficiais dos pavimentos.

Depois de caracterizadas as diferentes superfícies dos trechos ensaiados com o protótipo, também se considerou importante nesta fase do trabalho proceder ao estudo das características mecânicas das misturas betuminosas a considerar para análise da sustentabilidade de diferentes estruturas de

pavimentos (Capítulo 8). Com efeito, o dimensionamento das estruturas de pavimentos alternativas depende de algumas características aqui avaliadas, em especial o módulo de rigidez das misturas.

6.2. Ensaios para caracterização das diferentes misturas e superfícies de pavimentos estudadas nos trechos

Uma vez que para a construção do trecho de ensaios utilizado pelo protótipo anteriormente apresentado era necessária uma quantidade de mistura betuminosa relativamente elevada, optou-se por recorrer aos serviços de empresas de construção, adquirindo-se misturas produzidas nas suas centrais de produção, em vez de se produzirem no Laboratório de Pavimentos do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho.

Uma vez realizado o seu transporte até ao laboratório, procedeu-se à aplicação da mistura no molde existente para o efeito (Figura 36a), e ao respetivo controlo da temperatura (Figura 36b). A compactação foi realizada com recurso a um cilindro compactador (Figura 36c). Relativamente a esta atividade verificaram-se algumas dificuldades decorrentes de limitações de espaço para manobrar o cilindro, no entanto, apesar das condições espaciais não serem as desejáveis, considera-se que a superfície obtida (Figura 37) reunia as condições necessárias para a realização dos ensaios, sem que fosse posta em causa a sua validade.

Embora as empresas que produziram as misturas indicassem algumas das suas características, foi necessário proceder à realização de alguns ensaios adicionais com vista à sua caracterização física, bem como à sua caracterização superficial de forma a estabelecerem-se comparações relativamente à resistência ao rolamento e consumo de combustível em função destas últimas características.

Assim, para determinação da composição das diferentes misturas procedeu-se à determinação da sua percentagem de ligante por incineração, bem como à análise granulométrica do material resultante.

De forma a proceder à caracterização superficial das misturas determinou-se, sobre cada trecho, a Profundidade Média da Textura (*Mean Texture Depth* – MTD), a Profundidade Estimada da Textura (*Estimated Texture Depth* – ETD) e o Coeficiente de Atrito Pontual (*Pendulum Test Value* – PTV).



a) Espalhamento da mistura



b) Verificação da temperatura da mistura



c) Compactação com o cilindro

Figura 36 – Espalhamento e compactação de uma mistura betuminosa aplicada num dos trechos



Figura 37 – Aspeto final de um dos trechos construídos

Nas secções seguintes é apresentada uma breve descrição dos ensaios anteriormente referidos.

6.2.1. Percentagem de ligante das misturas betuminosas

Para proceder à determinação da percentagem de ligante presente em cada mistura utilizou-se o método de ignição apresentado na Norma EN 12697-39 (2012), que tem por base a incineração do ligante (Figura 38).



Figura 38 – Determinação das percentagens de ligante das misturas betuminosas aplicadas nos trechos

6.2.2. Análise granulométrica dos agregados das misturas betuminosas

A análise granulométrica dos agregados foi realizada de acordo com a Norma EN 12697-2 (2002), tendo sido para isso utilizadas as amostras de agregados resultantes do processo anteriormente apresentado (determinação da percentagem de ligante por ignição). Na Figura 39 é apresentado o processo mecânico de peneiração desse material.



Figura 39 – Peneiração mecânica dos agregados resultantes do processo de determinação da percentagem de ligante por ignição

6.2.3. Determinação da Profundidade Média da Textura (MTD)

Para a determinação da Profundidade Média da Textura, também conhecida por MTD (sigla que deriva da designação inglesa *Mean Texture Depth*), utilizou-se o denominado “método da mancha volumétrica” ou “método da mancha de areia” em conformidade com a Norma NP EN 13036-1 (2011). Este método utiliza um determinado volume de areia ou esferas de vidro que é espalhado na superfície do pavimento sob a forma de uma mancha circular. O cálculo da superfície dessa mancha é feito a partir da medição do seu diâmetro, dividindo-se o volume de areia pela área coberta (Equação 13). Obtém-se assim um valor que representa a profundidade média da camada de areia, isto é, a “profundidade média da textura” (Figura 40).

$$MTD = \frac{4V}{\pi D^2} \quad (13)$$

onde MTD é a profundidade média da textura, expressa em milímetros (mm); V é o volume da amostra, expresso em milímetros cúbicos (mm³); e D é o diâmetro médio da área coberta pelo material, expresso em milímetros (mm).

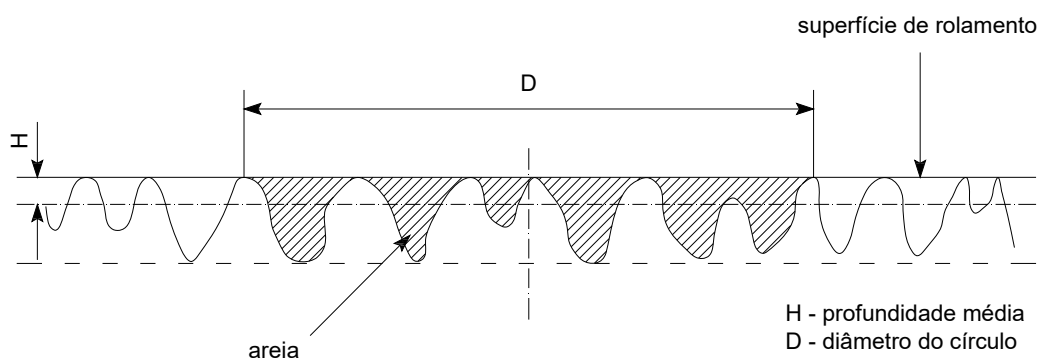


Figura 40 – Ilustração do princípio do método da mancha de areia (adaptado de Branco *et al.* (2005))

Na Figura 41 é apresentada a realização do ensaio da mancha de areia com o espalhamento das esferas de vidro e medição da respetiva mancha na superfície do pavimento de um dos trechos em estudo neste trabalho.



a) espalhamento das esferas de vidro

b) medição da mancha

Figura 41 – Realização do ensaio da mancha de areia num dos trechos em estudo

O ensaio da mancha de areia foi realizado em quatro pontos da pista e em três momentos distintos (após a construção da pista, após a realização de um ciclo de ensaios com o protótipo, às diversas velocidades e com os diversos pesos, e após um segundo ciclo de ensaios).

6.2.4. Determinação da Profundidade Estimada da Textura (ETD)

A Profundidade Estimada da Textura, também conhecida por ETD (sigla da designação inglesa *Estimated Texture Depth*), foi calculada através de uma equação de transformação aplicada aos valores da Profundidade Média do Perfil, também conhecida por MPD (do inglês *Mean Profile Depth*), em conformidade com a Norma NP EN ISO 13473-1 (2011). Essa norma refere que o método volumétrico da mancha não é muito preciso e que apresenta algumas desvantagens como o facto de depender do operador e de apenas poder ser utilizado em superfícies parcial ou totalmente fechadas à circulação. As técnicas de medição sem contacto com o perfil de uma superfície apresentam assim vantagens, dado que os valores resultantes do registo do perfil apresentam, em geral, elevados coeficientes de correlação com a profundidade da textura medida com o método volumétrico da mancha.

O registo do perfil foi efetuado com um laser SICK OD2-N50W10U0 acoplado ao braço existente no protótipo para esse efeito, conforme apresentado na Figura 42.



Figura 42 – Laser utilizado para medição e registo do perfil das superfícies do pavimento em estudo

Com recurso ao laser apresentado e a um *software* desenvolvido para o efeito, em LabVIEW, procedeu-se à determinação dos valores de MPD em intervalos de 10 cm (linha de base), em conformidade com o esquema apresentado na Figura 43 e na Equação 14.

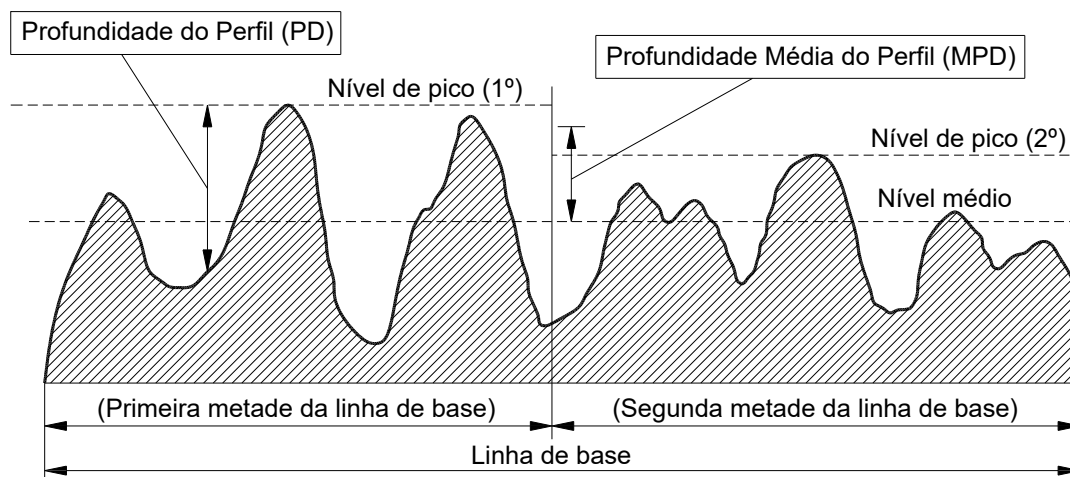


Figura 43 – Ilustração dos termos usados na determinação do MPD (NP EN ISO 13473-1 (2011))

$$MPD = \frac{Nível\ de\ pico\ (1^{\circ}) + Nível\ de\ pico\ (2^{\circ})}{2} - Nível\ médio \quad (14)$$

A Profundidade Estimada da Textura (ETD) foi depois obtida a partir dos valores de MPD através da Equação 15 (NP EN ISO 13473-1 (2011)):

$$ETD = 0,2 + 0,8 \times MPD \quad (15)$$

onde ETD e MPD são expressos em milímetros (mm).

O laser foi colocado em 5 posições diferentes, de forma a efetuar medições nas 5 zonas de contacto entre o pneu e o pavimento identificadas na Figura 44 (numeradas por ordem crescente do interior para o exterior do pneu), e o equipamento deu três voltas completas com o laser colocado em cada uma das zonas de contacto referidas. Esta medição foi realizada nas cinco zonas referidas para se avaliar se existem diferenças significativas nas medições realizadas nos vários locais de contacto entre o pneu e a superfície do pavimento, e para permitir encontrar um valor médio representativo de toda a largura de contacto entre ambas as superfícies.



Figura 44 – Zonas de contacto entre o pneu e o pavimento

À semelhança do método da mancha de areia, foram realizados ensaios em 3 momentos distintos (após construção da pista, após um ciclo completo de ensaios para determinação da resistência ao rolamento, e após novo ciclo de ensaios).

6.2.5. Determinação do Coeficiente de Atrito Pontual (PTV)

O valor do Coeficiente de Atrito Pontual, ou PTV (sigla da designação inglesa *Pendulum Test Value*), foi obtido através da realização de ensaios com o pêndulo britânico conforme definido na Norma Europeia

EN 13036-4 (2011). Este ensaio permite determinar a resistência ao deslizamento/derrapagem de uma superfície, a qual é medida através do braço do pêndulo (Figura 45). O PTV corresponde à perda de energia da borracha do pêndulo ao deslizar sobre a superfície de ensaio e consiste num valor padronizado da resistência ao deslizamento/derrapagem.



Figura 45 – Realização do ensaio com o Pêndulo Britânico num dos trechos em estudo

O ensaio com o Pêndulo Britânico foi realizado nos mesmos locais da mancha de areia, isto é, em quatro pontos da pista, e em três momentos distintos (após a construção da pista, após a realização do primeiro ciclo de ensaios com o protótipo e após o segundo ciclo de ensaios).

6.3. Resultados dos ensaios de caracterização das diferentes misturas e superfícies de pavimentos estudadas nos trechos

Com vista à determinação das diferentes resistências ao rolamento, através do esforço de torque e do consumo de energia e, conseqüentemente, do consumo de combustível, foram ensaiadas quatro superfícies de pavimento diferentes. Para facilitar a descrição dessas superfícies utilizadas nos trechos ensaiados com o protótipo, as mesmas foram denominadas de superfície A, B, C e D. Em seguida apresenta-se uma descrição mais pormenorizada de cada uma das superfícies estudadas, bem como os resultados da sua caracterização.

6.3.1. Caracterização da Superfície A

A primeira superfície estudada foi construída com uma mistura densa do tipo betão betuminoso (AC 14 surf), vulgarmente utilizada em camadas de desgaste (Figura 46).



Figura 46 – Trecho construído com mistura AC 14 surf (superfície A)

Com base na realização dos ensaios anteriormente descritos obtiveram-se os resultados a seguir apresentados.

i) Percentagem de ligante

Com a determinação, por ignição, do teor em betume, concluiu-se que, para a mistura aplicada no trecho com a superfície A, esta percentagem era de 5,4%. Este valor é relativamente elevado em comparação com os valores habitualmente utilizados neste tipo de misturas, o que permitiu ter melhor trabalhabilidade da mistura durante a sua aplicação no trecho.

ii) Granulometria dos agregados

Após peneiração e respetivas pesagens do material resultante do processo de incineração para determinação da percentagem de ligante (Figura 47), obteve-se a curva granulométrica apresentada na Figura 48.



Figura 47 – Agregados resultantes da separação do material incinerado para determinação da percentagem de ligante da mistura aplicada no trecho correspondente à superfície A

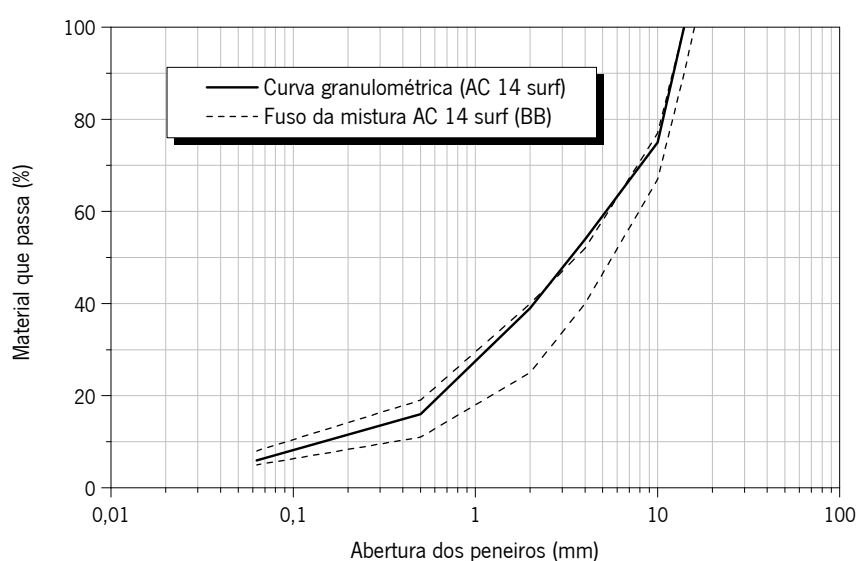


Figura 48 – Curva granulométrica dos agregados utilizados mistura aplicada no trecho correspondente à superfície A

Da análise da curva granulométrica dos agregados utilizados na mistura AC 14 surf (BB) constata-se que esta apresenta uma curva contínua, cumprindo assim os pressupostos de uma mistura densa. A curva, embora se situe quase sempre dentro do fuso granulométrico definido pelo Caderno de Encargos da Estradas de Portugal (EP, 2014a), encontra-se bastante próxima do limite superior definido para este tipo de misturas, chegando mesmo a ultrapassar ligeiramente o limite máximo no que respeita aos agregados que passam no peneiro de 4 mm.

iii) Profundidade Média da Textura (MTD)

Os valores da Profundidade Média da Textura (MTD) da superfície A são indicados no Quadro 8 tendo em consideração as condições de ensaio anteriormente apresentadas.

Quadro 8 – Profundidade Média da Textura (MTD) da superfície A (mm)

Momento	Local 1	Local 2	Local 3	Local 4	Média
Após construção do trecho	0,42	0,46	0,47	0,44	0,45
Após 1º ciclo de ensaios	0,40	0,71	0,38	0,47	0,49
Após 2º ciclo de ensaios	0,40	0,67	0,32	0,38	0,44
Média	0,41	0,61	0,39	0,43	0,46

Conclui-se assim que a superfície A apresentava uma Profundidade Média da Textura (MTD) de 0,46 mm. De uma forma geral, e comparando os quatro locais ensaiados, constata-se que a Profundidade Média da Textura apresenta uma certa regularidade. A única exceção a registar é o local 2, no qual houve um aumento considerável (superior a 50%) entre a medição efetuada após a construção do trecho e a medição efetuada após o primeiro ciclo de ensaios. Esse aumento deverá ter-se ficado a dever a alguma desagregação que terá ocorrido no local, eventualmente decorrente das dificuldades de compactação já referidas anteriormente. Não tendo havido grande variação dos resultados, considera-se que os valores médios obtidos são representativos da superfície.

iv) Profundidade Estimada da Textura (ETD)

Conforme apresentado anteriormente, a Profundidade Estimada da Textura foi obtida a partir dos valores da Profundidade Média do Perfil (MPD), cujos valores médios obtidos na superfície A são apresentados no Quadro 9.

Quadro 9 – Média dos valores da Profundidade Média do Perfil (MPD) da superfície A (mm)

Momento	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5	Média
Após construção do trecho	0,64	0,62	0,65	0,66	0,65	0,64
Após 1º ciclo de ensaios	0,83	0,59	0,68	0,89	0,72	0,74
Após 2º ciclo de ensaios	0,81	0,57	0,65	0,77	0,71	0,69
Média	0,76	0,59	0,66	0,78	0,69	0,70

Da análise dos valores apresentados no Quadro 9 conclui-se que a média dos valores de MPD obtidos para a Superfície A na zona de contacto entre os pneus e o pavimento é de 0,70 mm. Através da Equação 15 converteu-se o valor de MPD em ETD (Profundidade Estimada da Textura), a qual se

concluiu ser de 0,76 mm. Da análise dos valores de MPD obtidos, verifica-se que estes, em média, aumentaram com a realização do primeiro ciclo de ensaios, eventualmente devido à desagregação de algumas partículas que não estariam tão coesas, diminuindo depois, com a realização do segundo ciclo de ensaios, nas cinco zonas analisadas. O aumento verificado após o primeiro ciclo de ensaios é mais pronunciado nas zonas 1 e 4. Apesar dessas variações, os valores médios poderão considerar-se representativos da superfície, sendo utilizados nas análises do Capítulo 7.

Com os valores das medições efetuadas pelo laser para cálculo do MPD, definiu-se ainda o perfil do trecho construído com a mistura que deu origem à superfície A, o qual se apresenta na Figura 49.

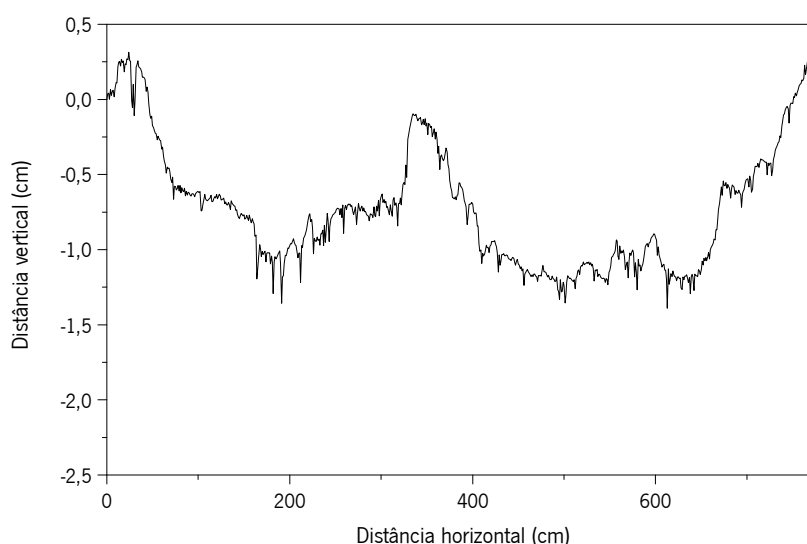


Figura 49 – Perfil longitudinal do trecho construído com mistura que deu origem à superfície A

Da análise do perfil apresentado na Figura 49 constata-se que este apresenta uma certa irregularidade. Esta em parte poderá dever-se a uma eventual inclinação da base que lhe serviu de suporte (o chão do laboratório), mas dever-se-á sobretudo às dificuldades pontuais de compactação já referidas. De qualquer forma, os desníveis verificados, face à distância horizontal (perímetro da trajetória), não se consideram significativos ao ponto de colocar em causa a validade dos resultados.

v) Coeficiente de Atrito Pontual (PTV)

Os valores de PTV obtidos no ensaio com o Pêndulo Britânico sobre a superfície A, nas condições de ensaio já descritas, são apresentados no Quadro 10.

Quadro 10 – Valores de PTV obtidos na superfície A

Momento	Local 1	Local 2	Local 3	Local 4	Média
Após construção do trecho	57	65	55	62	60
Após 1º ciclo de ensaios	57	66	57	63	61
Após 2º ciclo de ensaios	59	67	58	63	62
Média	58	66	57	63	61

Conclui-se assim que a média dos valores do PTV obtidos para a superfície A foi de 61. No entanto, tendo em conta que o valor mínimo estabelecido no Caderno de Encargos da Estradas de Portugal, S.A. (EP, 2014b) para camadas de desgaste é de 60, conclui-se que em dois dos quatro locais ensaiados esse requisito não é cumprido. Esses dois locais (1 e 3) apresentaram logo, no início, valores inferiores ao mínimo e, embora o valor de PTV tenha aumentado com a circulação do equipamento (tal como é habitual nas estradas devido à ação contínua do tráfego, o qual vai desgastando a película de betume que cobre os agregados), não chegaram a atingir o valor mínimo referido. Também neste caso as variações não foram significativas, pelo que se considera os seus valores médios representativos da superfície em estudo.

6.3.2. Caracterização da Superfície B

A segunda superfície estudada (Superfície B) foi obtida através da sobreposição de um *slurry seal* simples à superfície A, alterando assim as características dessa superfície (Figura 50).



Figura 50 – Trecho resultante da sobreposição à superfície anterior (AC 14 surf) de *slurry seal* (superfície B)

A camada aplicada neste caso é bastante fina pelo que tem uma influência reduzida a nível estrutural, alterando essencialmente a superfície de rolamento. Após realização dos ensaios de caracterização anteriormente descritos obtiveram-se os resultados a seguir apresentados.

i) Percentagem de ligante

Dado a quantidade de mistura (*slurry seal*) necessária para o tratamento superficial aplicado na Superfície B ser bastante inferior à anterior, optou-se pela sua produção no Laboratório de Pavimentos do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho. A percentagem de ligante residual definida para esta mistura foi assim de 7%, utilizando-se uma emulsão betuminosa C60B4 Slu. Dado que esta mistura foi produzida em laboratório, não se realizou o ensaio de determinação da percentagem de betume por incineração. A percentagem de ligante indicada é a mínima que pode ser utilizada na produção destas misturas.

ii) Granulometria dos agregados

Após peneiração e respetivas pesagens de uma amostra dos agregados utilizados na produção do *slurry seal* (Figura 51) aplicado no trecho correspondente à Superfície B, obteve-se a curva granulométrica apresentada na Figura 52.



Figura 51 – Agregados utilizados na produção do *slurry seal* aplicado no trecho correspondente à superfície B

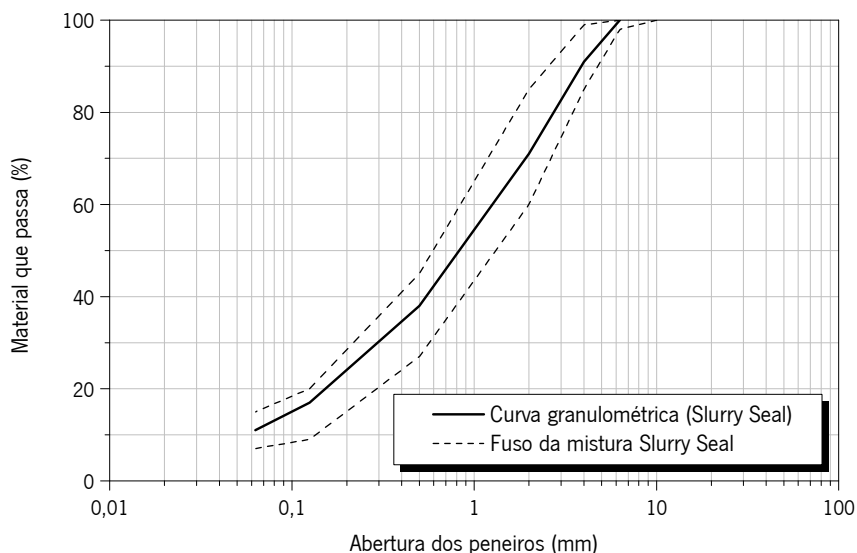


Figura 52 – Curva granulométrica dos agregados utilizados no *slurry seal* aplicado no trecho correspondente à superfície B

Da análise da curva granulométrica dos agregados utilizados na produção do *slurry seal* verifica-se que esta se situa sempre dentro do fuso granulométrico definido pelo Caderno de Encargos da Estradas de Portugal (EP, 2014a) para um *slurry seal* simples. A dimensão máxima do agregado é de 4 mm, permitindo assim o espalhamento numa camada fina que deverá reduzir a rugosidade da superfície A, compactada e ensaiada anteriormente.

iii) Profundidade Média da Textura (MTD)

Os valores da Profundidade Média da Textura (MTD) da superfície B são indicados no Quadro 11 tendo em consideração as condições de ensaio anteriormente apresentadas.

Quadro 11 – Profundidade Média da Textura (MTD) da superfície B (mm)

Momento	Local 1	Local 2	Local 3	Local 4	Média
Após construção do trecho	0,40	0,34	0,43	0,42	0,40
Após 1º ciclo de ensaios	0,27	0,31	0,26	0,33	0,29
Após 2º ciclo de ensaios	0,33	0,31	0,24	0,27	0,29
Média	0,33	0,32	0,31	0,34	0,33

Conclui-se assim que a superfície B apresentava uma Profundidade Média da Textura (MTD) de 0,33 mm. A análise dos resultados apresentados permite concluir que houve uma diminuição

generalizada da Profundidade Média da Textura após o primeiro ciclo de ensaios devido à compactação do *slurry seal*, ou ao facto de algumas partículas de mistura se poderem ter soltado, dado tratar-se de uma mistura produzida a frio e, portanto, não ser tão resistente à desagregação, sendo depois as variações mais reduzidas. Relativamente aos locais ensaiados, não se verifica grande variabilidade entre eles. Conclui-se também que a aplicação do *slurry seal* permitiu reduzir a média do MTD de 0,46 mm (registados na superfície A) para 0,33 mm na superfície B. Apesar dessa diminuição com a realização do primeiro ciclo de ensaios, os valores médios registados em cada local são bastante próximos, pelo que se poderá considerar este estudo representativo da superfície.

iv) Profundidade Estimada da Textura (ETD)

A Profundidade Estimada da Textura foi determinada a partir dos valores da Profundidade Média do Perfil (MPD), apresentando-se no Quadro 12 a média dos valores de MPD obtidos na superfície B.

Quadro 12 – Média dos valores da Profundidade Média do Perfil (MPD) da superfície B (mm)

Momento	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5	Média
Após construção do trecho	0,75	0,59	0,62	0,72	0,67	0,67
Após 1º ciclo de ensaios	0,42	0,36	0,40	0,41	0,50	0,42
Após 2º ciclo de ensaios	0,43	0,40	0,41	0,45	0,50	0,44
Média	0,53	0,45	0,48	0,53	0,56	0,51

Da análise dos valores apresentados no Quadro 12 conclui-se que a média dos valores de MPD obtidos para a Superfície B na zona de contacto entre os pneus e o pavimento é de 0,51 mm. Através da Equação 15 converteu-se o valor de MPD em ETD (Profundidade Estimada da Textura), a qual se concluiu ser de 0,61 mm. À semelhança daquilo que foi verificado para o MTD, também os valores de MPD diminuíram consideravelmente com a realização do primeiro ciclo de ensaios, devido à compactação do *slurry seal* ou ao facto de algumas partículas se terem soltado com a passagem sucessiva das rodas. À semelhança da superfície A, as zonas 2 e 3 são as que apresentam valores mais baixos de Profundidade Média do Perfil, havendo, contudo, bastante uniformidade nos valores registados nas diferentes zonas, considerando-se, por isso, o estudo representativo da superfície.

Com os valores das medições efetuadas pelo laser para cálculo do MPD, definiu-se ainda o perfil do

trecho construído com o *slurry seal* sobre a superfície A, dando assim origem à superfície B, o qual se apresenta na Figura 53.

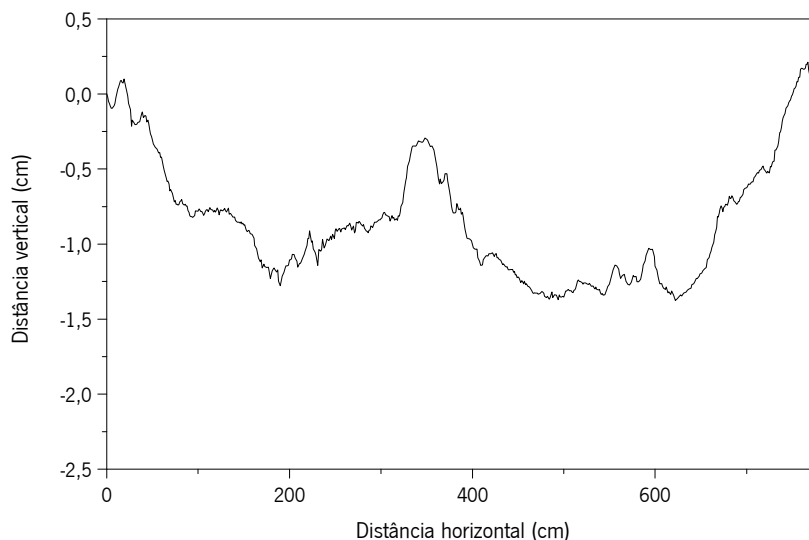


Figura 53 – Perfil longitudinal do trecho construído com *slurry seal* (sobre a superfície A) que deu origem à superfície B

São evidentes as semelhanças entre o perfil apresentado na Figura 53, relativo à superfície B, e o perfil apresentado na Figura 49, relativo à superfície A. As diferenças existentes entre os dois perfis consistem apenas numa suavização do perfil inicial decorrente da aplicação da camada de *slurry seal*. Sendo esta uma camada bastante fina, não consegue corrigir alguns problemas de regularidade já referidos, mantendo-se a amplitude dos desníveis praticamente inalterada.

v) Coeficiente de Atrito Pontual (PTV)

Os valores de PTV obtidos no ensaio com o Pêndulo Britânico sobre a superfície B, nas condições de ensaio descritas anteriormente, são apresentados no Quadro 13.

Quadro 13 – Valores de PTV obtidos na superfície B

Momento	Local 1	Local 2	Local 3	Local 4	Média
Após construção do trecho	44	42	52	49	47
Após 1º ciclo de ensaios	43	40	50	49	45
Após 2º ciclo de ensaios	43	41	51	49	46
Média	43	41	51	49	46

Conclui-se assim que a média dos valores do PTV obtidos para a superfície B foi de 46. No entanto, tendo em conta que o valor mínimo estabelecido no Caderno de Encargos da Estradas de Portugal, S.A. (EP, 2014b) é de 60, conclui-se que para este pavimento, esse requisito não é cumprido. Embora o *slurry seal* possa ser uma solução interessante em certas condições, os resultados obtidos demonstram que requer alguns cuidados, de forma a respeitar o valor mínimo do PTV e não colocar em causa as condições de segurança. Numa situação real de obra poderia ser necessário realizar uma aplicação de um microaglomerado betuminoso a frio (ou *slurry seal*) duplo, de forma a obter uma maior textura superficial, a qual resultaria em valores de atrito (PTV) mais adequados. Para o presente estudo, o objetivo era o de obter condições de textura e atrito diferenciados pelo que, tendo sido obtidos resultados uniformes ao longo do ensaio, poderá considerar-se os valores médios representativos da superfície em estudo.

6.3.3. Caracterização da Superfície C

A terceira superfície estudada foi construída com uma mistura porosa do tipo betão betuminoso drenante (PA 12,5), por vezes utilizada em camadas desgaste (Figura 54).



Figura 54 – Trecho construído com mistura PA 12,5 (superfície C)

Esta mistura também foi fabricada na central betuminosa duma empresa que se situa próxima da Universidade do Minho. Com base na realização dos ensaios anteriormente descritos obtiveram-se os resultados a seguir apresentados.

1) Percentagem de ligante

Com a determinação, por ignição, do teor em betume, concluiu-se que esta percentagem de ligante era de 4,0% para a mistura aplicada na superfície C. Embora se possa associar este valor mais baixo da percentagem de ligante ao tipo de mistura aberta que se estava a estudar, na prática este valor é ligeiramente inferior aos habitualmente observados nestas misturas, o que poderia ter diminuído a trabalhabilidade das misturas. Apesar disso, dado o cuidado com que se realizou o processo de compactação em laboratório, não se observaram grandes problemas a esse respeito.

ii) Granulometria dos agregados

Após peneiração e respetivas pesagens do material resultante do processo de incineração para determinação da percentagem de ligante (Figura 55), obteve-se a curva granulométrica apresentada na Figura 56.



Figura 55 – Agregados resultantes da separação do material incinerado para determinação da percentagem de ligante da mistura aplicada no trecho correspondente à superfície C

Como se pode verificar pela análise da Figura 55, os agregados são mais monogranulares, e com um aspeto bastante cúbico, uma característica essencial para a produção das misturas drenantes. Da análise da curva granulométrica dos agregados utilizados na mistura PA 12,5 (BBd), apresentada na Figura 56, constata-se que esta se situa sempre dentro do fuso granulométrico definido pelo Caderno de Encargos da Estradas de Portugal (EP, 2014a) para este tipo de misturas. É também evidente a descontinuidade apresentada por esta curva, confirmada por uma queda abrupta na percentagem de material que passa entre os peneiros de 4 e 10 mm.

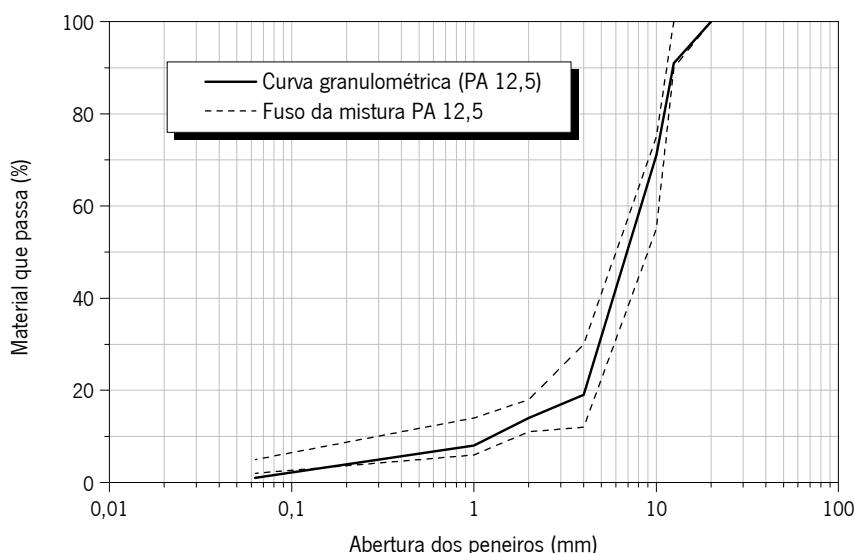


Figura 56 – Curva granulométrica dos agregados utilizados na mistura aplicada no trecho correspondente à superfície C

iii) Profundidade Média da Textura (MTD)

Os valores da Profundidade Média da Textura (MTD) da superfície C são indicados no Quadro 14 tendo em consideração as condições de ensaio anteriormente apresentadas.

Quadro 14 – Profundidade Média da Textura (MTD) da superfície C (mm)

Momento	Local 1	Local 2	Local 3	Local 4	Média
Após construção do trecho	2,86	1,94	2,84	2,52	2,54
Após 1º ciclo de ensaios	2,53	1,76	2,56	2,43	2,32
Após 2º ciclo de ensaios	2,39	1,68	2,38	2,02	2,12
Média	2,59	1,79	2,59	2,32	2,33

Conclui-se assim que a superfície C apresentava uma Profundidade Média da Textura (MTD) de 2,33 mm. Os valores obtidos para esta superfície são muito superiores aos obtidos para as superfícies anteriores (A e B), sem surpresa, dado tratar-se de uma mistura aberta. Com a realização dos ensaios, os valores de MTD foram diminuindo ligeiramente, eventualmente devido ao preenchimento de alguns vazios com borracha dos pneus que se iam desgastando. Apesar dessas variações, não estará em causa a representatividade dos resultados, pelo que os valores médios registados em cada momento poderão ser utilizados nas análises a efetuar no Capítulo 7.

iv) Profundidade Estimada da Textura (ETD)

Conforme apresentado anteriormente, a Profundidade Estimada da Textura foi obtida a partir dos valores da Profundidade Média do Perfil (MPD), cujos valores médios obtidos na superfície C são apresentados no Quadro 15.

Quadro 15 – Média dos valores da Profundidade Média do Perfil (MPD) da superfície C (mm)

Momento	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5	Média
Após construção do trecho	2,29	2,34	2,27	2,31	2,41	2,32
Após 1º ciclo de ensaios	2,08	2,15	2,19	1,95	2,14	2,10
Após 2º ciclo de ensaios	2,02	2,18	2,09	1,78	1,93	2,00
Média	2,13	2,22	2,18	2,01	2,16	2,14

Da análise dos valores apresentados no Quadro 15 conclui-se que a média dos valores de MPD obtidos para a superfície C na zona de contacto entre os pneus e o pavimento é de 2,14 mm. Através da Equação 15 converteu-se o valor de MPD em ETD (Profundidade Estimada da Textura), a qual se concluiu ser de 1,91 mm. À semelhança daquilo que foi verificado para os valores do MTD, também para o MPD se registaram valores bem mais elevados, comparativamente às superfícies anteriores, bem como a tendência de diminuição dos valores ao longo do ensaio, facto que se ficará a dever à razão anteriormente apresentada. De referir também a pouca variabilidade dos valores entre as cinco zonas analisadas, confirmando assim a representatividade dos valores médios para a continuação do estudo, nomeadamente nas análises efetuadas no capítulo seguinte.

Com os valores das medições efetuadas pelo laser para cálculo do MPD, definiu-se ainda o perfil do trecho construído com a mistura que deu origem à superfície C, o qual se apresenta na Figura 57.

Da análise do perfil apresentado fica evidente a existência de vários picos “negativos” ao longo do perfil, os quais estiveram na origem da maior textura já apresentada anteriormente. À semelhança dos perfis das misturas anteriores, nota-se uma certa e repetida irregularidade, confirmando assim que esta será uma replicação da irregularidade existente no chão do laboratório.

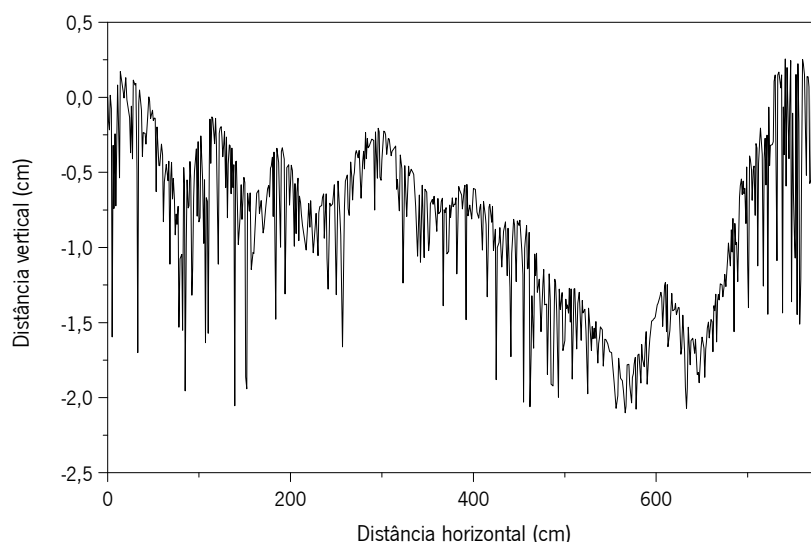


Figura 57 – Perfil longitudinal da pista construída com mistura C

v) Coeficiente de Atrito Pontual (PTV)

Os valores de PTV obtidos no ensaio com o Pêndulo Britânico sobre a superfície C, nas condições de ensaio já descritas, são apresentados no Quadro 16.

Quadro 16 – Valores de PTV obtidos na superfície C

Momento	Local 1	Local 2	Local 3	Local 4	Média
Após construção do trecho	71	67	73	70	70
Após 1º ciclo de ensaios	70	68	72	69	70
Após 2º ciclo de ensaios	70	67	71	69	69
Média	70	67	72	69	70

Conclui-se assim que a média dos valores do PTV obtidos para a superfície C foi de 70. Atendendo a que o valor mínimo estabelecido no Caderno de Encargos da Estradas de Portugal, S.A. (EP, 2014b) é de 60, este pavimento cumpre assim esse requisito, sendo a superfície C, desta forma e até ao momento, a única que cumpre este requisito na totalidade. Os valores de PTV obtidos para esta superfície são relativamente mais elevados que os das outras duas, facto que se afigura como uma mais-valia, quer em termos de segurança na aplicação em obra, quer em termos de amplitude de variação no estudo específico da influência deste parâmetro nas características em análise neste trabalho. A variação dos valores, quer em termos de local, quer em termos do momento da realização

do ensaio, é pouco significativa pelo que os valores médios obtidos se consideram representativos da superfície.

6.3.4. Caracterização da Superfície D

A quarta superfície estudada (superfície D) foi obtida vertendo uma calda de cimento sobre a mistura aberta utilizada na superfície C, calda essa que preencheu uma parte significativa dos vazios da superfície anterior, alterando assim as características dessa superfície, nomeadamente aumentando a sua rigidez e a superfície de contacto com os pneus, e reduzindo a textura (Figura 58).

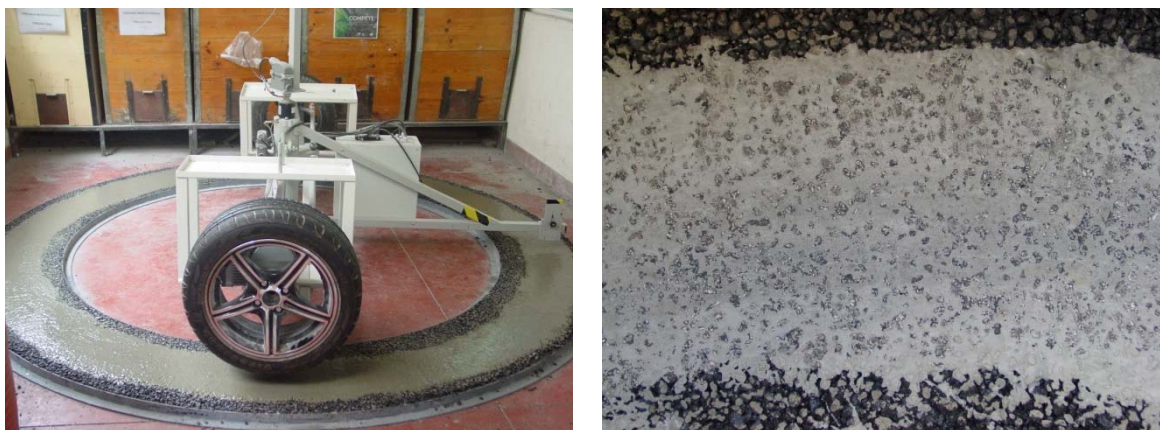


Figura 58 – Trecho resultante da sobreposição à superfície anterior (PA 12,5) de uma calda de cimento (superfície D)

A calda de cimento utilizada continha 1% de superplastificante e uma razão água/cimento de 0,35, baseando-se esta escolha nas conclusões apresentadas por Barbosa (2006) na sequência das formulações estudadas para a reabilitação de pavimentos drenantes com calda de cimento.

Dado que nesta superfície D não se produziu de facto uma mistura alternativa, a percentagem de ligante e a granulometria dos agregados não são apresentados. Com a realização dos ensaios de caracterização superficial desta solução obtiveram-se os resultados a seguir apresentados.

i) Profundidade Média da Textura (MTD)

Os valores da Profundidade Média da Textura (MTD) da superfície D são indicados no Quadro 17 tendo em consideração as condições de ensaio anteriormente apresentadas.

Quadro 17 – Profundidade Média da Textura (MTD) da superfície D (mm)

Momento	Local 1	Local 2	Local 3	Local 4	Média
Após construção do trecho	0,34	0,30	0,34	0,31	0,32
Após 1º ciclo de ensaios	0,30	0,32	0,33	0,31	0,32
Após 2º ciclo de ensaios	0,27	0,25	0,29	0,25	0,27
Média	0,30	0,29	0,32	0,29	0,30

Da análise dos resultados conclui-se que a superfície D apresentava uma Profundidade Média da Textura (MTD) de 0,30 mm. É de realçar uma redução significativa do valor de MTD, em comparação com o registado para a superfície C, a partir da qual esta solução foi construída. Essa redução já seria de se esperar, dado que a calda de cimento acabaria por preencher os vazios da mistura PA 12,5 (BBd), reduzindo assim a Profundidade Média da Textura. Não há uma variação significativa dos valores registados nos diferentes locais ensaiados pelo que se consideram os valores médios representativos da superfície.

ii) Profundidade Estimada da Textura (ETD)

A Profundidade Estimada da Textura foi determinada a partir dos valores da Profundidade Média do Perfil (MPD), apresentando-se no Quadro 18 a média dos valores de MPD obtidos na superfície D.

Quadro 18 – Média dos valores da Profundidade Média do Perfil (MPD) da superfície D (mm)

Momento	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5	Média
Após construção do trecho	0,40	0,37	0,36	0,37	0,39	0,38
Após 1º ciclo de ensaios	0,42	0,38	0,38	0,42	0,43	0,41
Após 2º ciclo de ensaios	0,41	0,41	0,39	0,40	0,40	0,40
Média	0,41	0,39	0,38	0,40	0,41	0,40

Da análise dos valores apresentados no Quadro 18 conclui-se que a média dos valores de MPD obtidos para a Superfície D na zona de contacto entre os pneus e o pavimento é de 0,40 mm. Através da Equação 15 converteu-se o valor de MPD em ETD (Profundidade Estimada da Textura), a qual se concluiu ser de 0,52 mm. À semelhança do MTD, também o MPD teve uma redução significativa do seu valor médio face à superfície que lhe deu origem (de 2,14 para 0,40 mm, neste caso), tendo a

calda de cimento transformado a superfície com maior textura (superfície C) na superfície com menor textura, entre as quatro estudadas. Não houve variações significativas dos valores de MPD ao longo do ensaio, eventualmente devido à elevada rigidez da superfície obtida, nem entre as diferentes zonas ensaiadas, o que permite que os valores médios sejam representativos da superfície.

Com os valores das medições efetuadas pelo laser para cálculo do MPD, definiu-se ainda o perfil do trecho construído com o espalhamento de calda de cimento sobre a superfície C, dando assim origem à superfície D, o qual se apresenta na Figura 59.

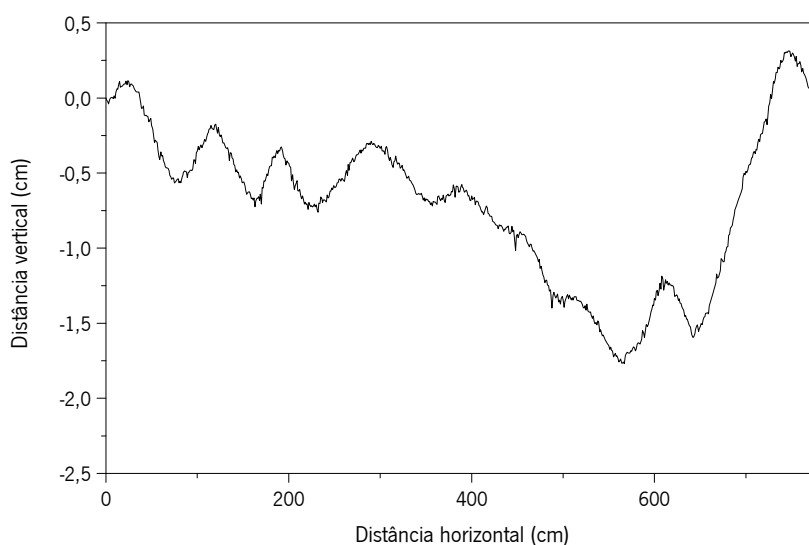


Figura 59 – Perfil longitudinal do trecho construído com calda de cimento (sobre a superfície C) e que deu origem à superfície D

Da comparação dos perfis da superfície C (Figura 57) e da superfície D (Figura 59) tornam-se evidentes as semelhanças entre ambos, resultando este último da suavização do anterior, como consequência da eliminação dos picos (reentrâncias) existentes na mistura drenante pela calda de cimento.

iii) Coeficiente de Atrito Pontual (PTV)

Os valores de PTV obtidos no ensaio com o Pêndulo Britânico sobre a superfície D, nas condições de ensaio descritas anteriormente, são apresentados no Quadro 19.

Quadro 19 – Valores de PTV obtidos na superfície D

Momento	Local 1	Local 2	Local 3	Local 4	Média
Após construção do trecho	37	41	38	32	37
Após 1º ciclo de ensaios	37	40	38	33	37
Após 2º ciclo de ensaios	36	41	38	33	37
Média	37	41	38	33	37

Conclui-se assim que a média dos valores do PTV obtidos para a superfície D foi de 37. No entanto, tendo em conta que o valor mínimo estabelecido no Caderno de Encargos da Estradas de Portugal, S.A. (EP, 2014b) é de 60, conclui-se que para este pavimento, esse requisito não é cumprido. Em consequência disso, esta solução por ser demasiado lisa, não poderia ser aplicada em estrada sem que fossem tomadas algumas medidas que provocassem algum desgaste da superfície e aumentassem o valor do PTV de forma a garantir as necessárias condições de segurança. Apesar disso, não existe grande variação dos valores registados pelo que os valores médios podem ser considerados representativos da superfície e, portanto, utilizados nas análises do capítulo seguinte, onde se pretende avaliar a influência destes parâmetros no consumo de energia e no torque.

6.4. Caracterização do módulo de rigidez das misturas a utilizar para análise da sustentabilidade de diferentes estruturas de pavimentos

Depois de caracterizadas as diferentes superfícies dos trechos ensaiados com o protótipo, também se considerou importante proceder ao estudo do módulo de rigidez das misturas betuminosas a considerar para análise da sustentabilidade de diferentes estruturas de pavimentos (Capítulo 8), em especial pela importância que essa propriedade tem no dimensionamento de pavimentos.

6.4.1. Ensaio de módulo de rigidez por flexão em quatro pontos

O módulo de rigidez é uma das principais propriedades de uma mistura, sendo esta propriedade dependente da temperatura a que a mistura se encontra, da frequência de carregamento e das características dos materiais usados nas misturas.

De modo a conhecer o módulo de rigidez das misturas, foram ensaiadas, a 20 °C, quatro vigas de cada mistura, em conformidade com a Norma EN 13108-20 (2006). Em cada ensaio é realizado um varrimento de frequências (0,1, 0,2, 0,5, 1, 2, 5, 8, 10 e 0,1 Hz) de acordo com a Norma EN 12697-26 (2012). O valor do módulo de rigidez a considerar para dimensionamento das diferentes estruturas de pavimentos (Capítulo 8) será o obtido à frequência de 8 Hz, de acordo com a Norma EN 13108-20 (2006). A Figura 60 demonstra o equipamento utilizado na determinação desta propriedade das misturas betuminosas.



Figura 60 – Equipamento utilizado no ensaio do módulo de rigidez

Para determinação do módulo de rigidez das várias misturas a considerar no dimensionamento, foi necessário proceder à sua produção e compactação de acordo com os processos a seguir descritos. O processo de produção as misturas betuminosas está representado na Figura 61. Inicialmente são introduzidos os agregados a quente, a uma temperatura ajustada a cada tipo de ligante utilizado (165 °C no caso do ligante 35/50 e 180 °C no caso do ligante modificado PMB), e em seguida é introduzido o betume à mesma temperatura. Após finalização do processo foi feito o controlo da temperatura de produção de cada mistura.



Figura 61 – Produção das misturas betuminosas

A seguir ao processo de produção, segue-se o espalhamento e compactação das misturas betuminosas, como demonstra a Figura 62. Inicialmente fez-se o espalhamento da mistura no molde, e confirma-se se a gama de temperaturas ideal para a compactação foi atingida. Depois procede-se à compactação da mistura betuminosa através de um cilindro, sendo que a baridade da mistura é controlada pela introdução duma massa definida de mistura betuminosa no volume do molde que tem dimensões conhecidas. No final deste processo, e após o arrefecimento da mistura, é efetuado o corte das lajes compactadas de modo a obter 4 vigas de cada mistura para o ensaio do módulo de rigidez.



Figura 62 – Processo de espalhamento e compactação das misturas betuminosas

As misturas betuminosas produzidas em laboratório e ensaiadas para determinação do módulo de rigidez foram as seguintes:

- Macadame betuminoso (AC 20 base 35/50 ou AC 20 bin 35/50, que na prática são a mesma mistura) utilizado na camada de base ou ligação;
- Betão betuminoso (AC 14 surf 35/50) utilizado na camada de desgaste;
- Mistura drenante (PA 12,5 PMB 25/55) utilizada na camada de desgaste;

- Mistura rugosa (AC 14 surf PMB 25/55) utilizada na camada de desgaste.

Estas misturas foram selecionadas de forma a ser possível proceder à análise da sustentabilidade de diferentes estruturas de pavimentos alternativas (Capítulo 8), procurando-se em especial estudar diferentes soluções para camada de desgaste que possam influenciar de forma mais significativa a resistência ao rolamento avaliada neste trabalho. Apesar disso, nesta fase o estudo destas misturas concentrou-se na avaliação do módulo de rigidez, que é um dado de entrada fundamental para o dimensionamento das várias estruturas de pavimento alternativas. Esses resultados são apresentados em seguida para cada mistura betuminosa.

6.4.2. Módulo de rigidez da mistura utilizada na camada de base (AC 20 base 35/50) ou ligação (AC 20 bin 35/50)

Nas Figuras 63 e 64 apresenta-se, respetivamente, a evolução do módulo de rigidez e do ângulo de fase, da mistura utilizada na camada de base (AC 20 base 35/50) ou ligação (AC 20 bin 35/50), com a frequência de ensaio. Os valores apresentados correspondem à média de quatro ensaios realizados a 20 °C.

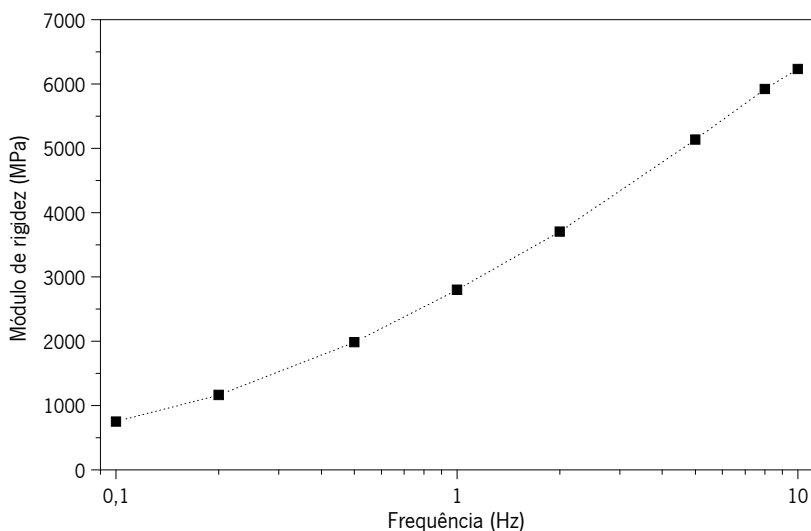


Figura 63 – Módulo de rigidez da mistura utilizada na camada de base (AC 20 base 35/50) ou ligação (AC 20 bin 35/50) à temperatura de 20 °C

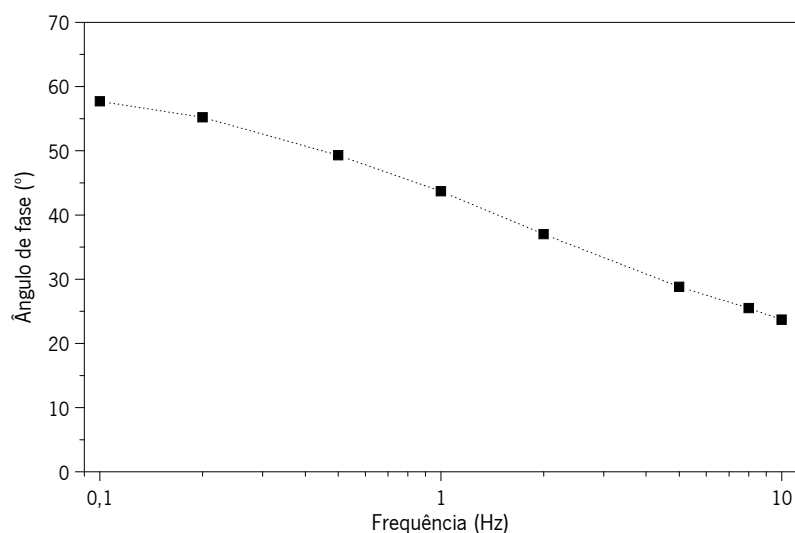


Figura 64 – Ângulo de fase da mistura utilizada na camada de base (AC 20 base 35/50) ou ligação (AC 20 bin 35/50) à temperatura de 20 °C

Estes ensaios foram realizados, em particular, para determinar o módulo de rigidez a utilizar no dimensionamento de diferentes estruturas de pavimentos (Capítulo 8), a uma temperatura de 20 °C e a uma frequência de 8 Hz. Nessas condições o valor médio do módulo de rigidez da mistura utilizada na camada de base (AC 20 base 35/50) ou ligação (AC 20 bin 35/50) é aproximadamente 5900 MPa, enquanto o ângulo de fase tem o valor de 25,5°.

6.4.3. Resultados do módulo de rigidez do betão betuminoso (AC 14 surf 35/50) utilizado na camada de desgaste

Nas Figuras 65 e 66 apresenta-se, respetivamente, a evolução do módulo de rigidez e do ângulo de fase, do betão betuminoso (AC 14 surf 35/50) utilizado na camada de desgaste, com a frequência de ensaio. Os valores apresentados correspondem à média de quatro ensaios realizados a 20 °C.

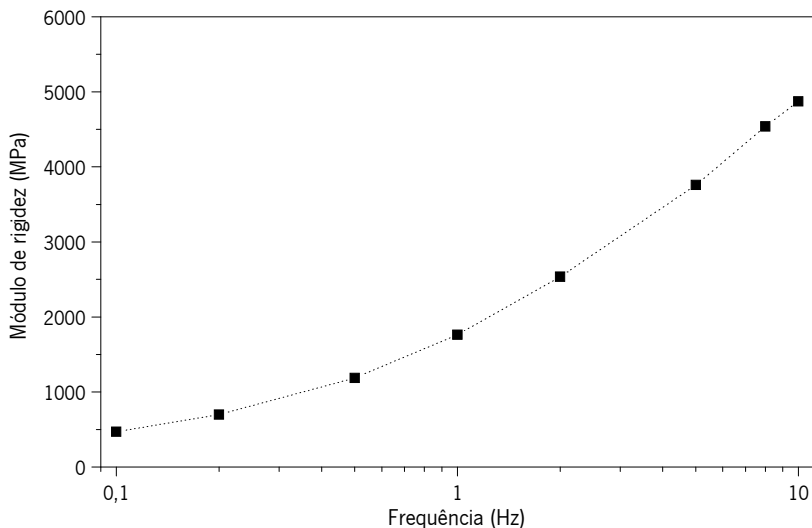


Figura 65 – Módulo de rigidez do betão betuminoso (AC 14 surf 35/50) utilizado na camada de desgaste à temperatura de 20 °C

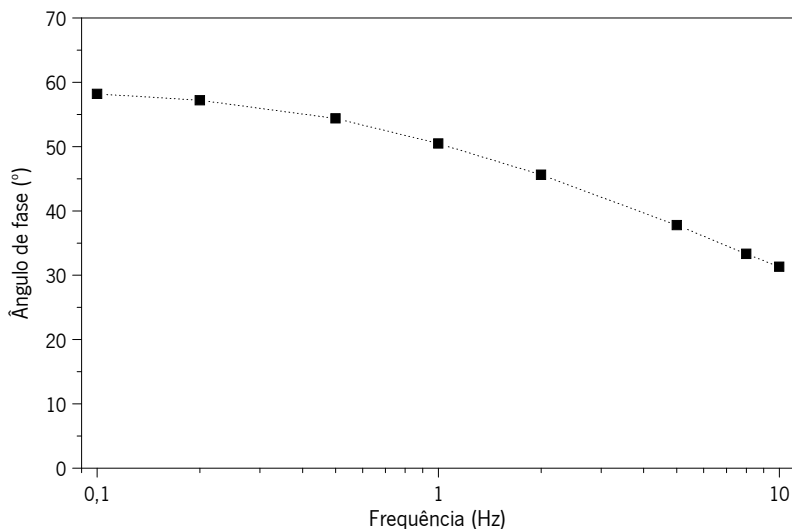


Figura 66 – Ângulo de fase do betão betuminoso (AC 14 surf 35/50) utilizado na camada de desgaste à temperatura de 20 °C

Estes ensaios foram realizados, em particular, para determinar o módulo de rigidez a utilizar no dimensionamento de diferentes estruturas de pavimentos (Capítulo 8), a uma temperatura de 20 °C e a uma frequência de 8 Hz. Nessas condições o valor médio do módulo de rigidez do betão betuminoso (AC 14 surf 35/50) utilizado na camada de desgaste é aproximadamente 4500 MPa, enquanto o ângulo de fase tem o valor de 33,3°.

6.4.4. Resultados do módulo de rigidez da mistura drenante (PA 12,5 PMB 25/55) utilizada na camada de desgaste

Nas Figuras 67 e 68 apresenta-se, respetivamente, a evolução do módulo de rigidez e do ângulo de fase da mistura drenante (PA 12,5 PMB 25/55), utilizada na camada de desgaste, com a frequência de ensaio. Os valores apresentados correspondem à média de quatro ensaios realizados a 20 °C.

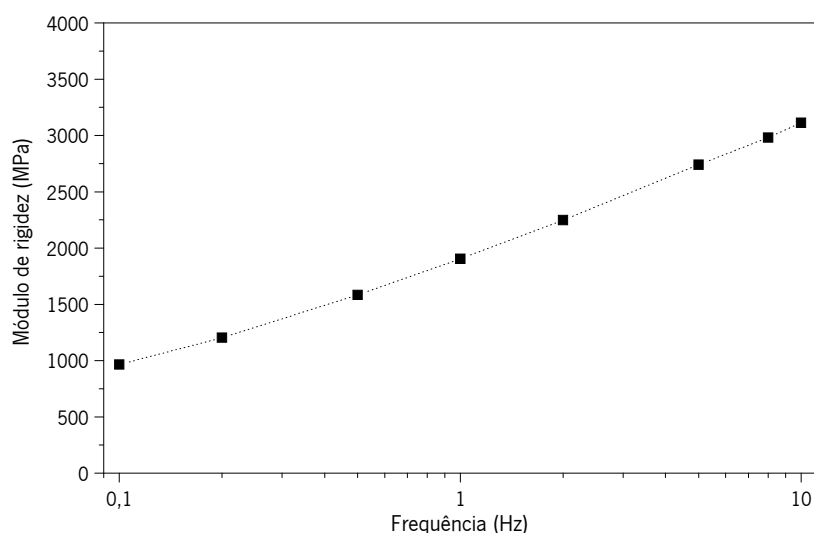


Figura 67 – Módulo de rigidez da mistura drenante (PA 12,5 PMB 25/55) utilizada na camada de desgaste à temperatura de 20 °C

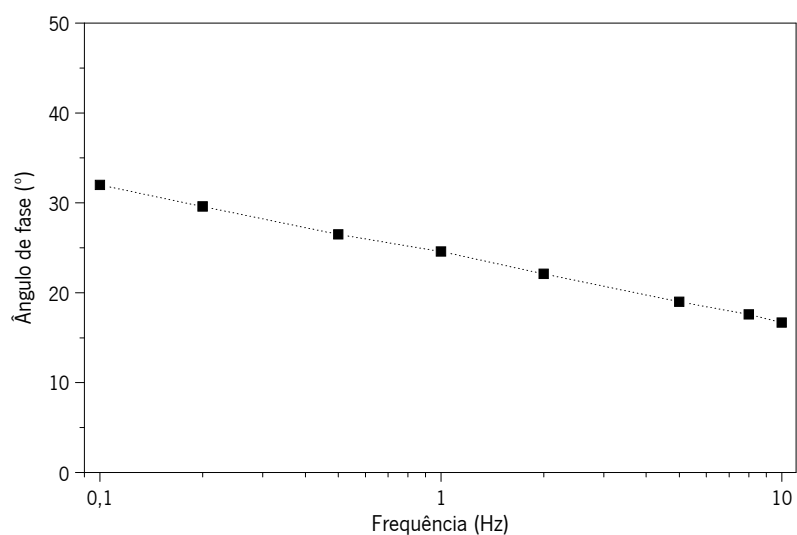


Figura 68 – Ângulo de fase da mistura drenante (PA 12,5 PMB 25/55) utilizada na camada de desgaste à temperatura de 20 °C

Estes ensaios foram realizados, em particular, para determinar o módulo de rigidez a utilizar no dimensionamento de diferentes estruturas de pavimentos (Capítulo 8), a uma temperatura de 20 °C e a uma frequência de 8 Hz. Nessas condições o valor médio do módulo de rigidez da mistura drenante (PA 12,5 PMB 25/55) utilizada na camada de desgaste é aproximadamente 3000 MPa, enquanto o ângulo de fase tem o valor de 17,6°.

6.4.5. Resultados do módulo de rigidez da mistura rugosa (AC 14 surf PMB 25/55) utilizada na camada de desgaste

Nas Figuras 69 e 70 apresenta-se, respetivamente, a evolução do módulo de rigidez e do ângulo de fase da mistura rugosa (AC 14 surf PMB 25/55), utilizada na camada de desgaste, com a frequência de ensaio. Os valores apresentados correspondem à média de quatro ensaios realizados a 20 °C.

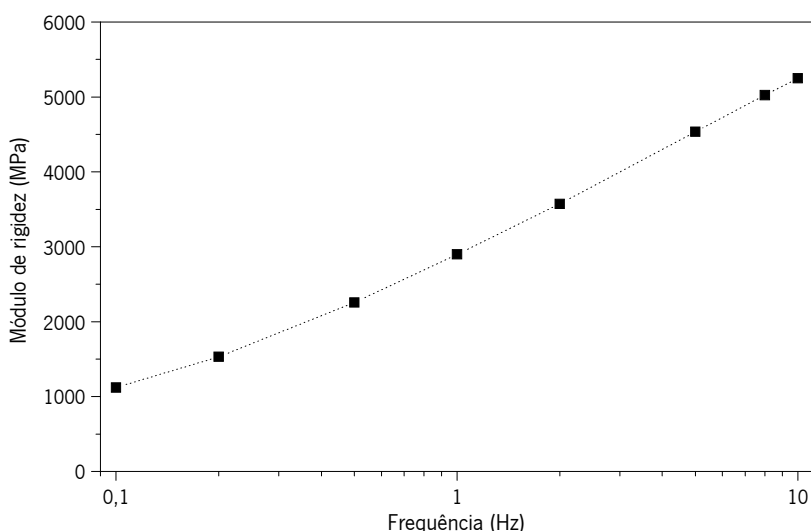


Figura 69 – Módulo de rigidez da mistura rugosa (AC 14 surf PMB 25/55) utilizada na camada de desgaste à temperatura de 20 °C

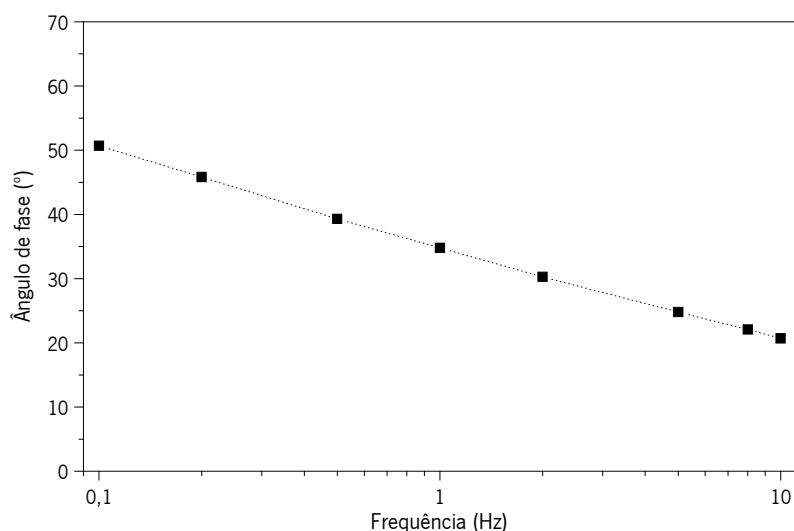


Figura 70 – Ângulo de fase da mistura rugosa (AC 14 surf PMB 25/55) utilizada na camada de desgaste à temperatura de 20 °C

Estes ensaios foram realizados, em particular, para determinar o módulo de rigidez a utilizar no dimensionamento de diferentes estruturas de pavimentos (Capítulo 8), a uma temperatura de 20 °C e a uma frequência de 8 Hz. Nessas condições o valor médio do módulo de rigidez da mistura rugosa (AC 14 surf PMB 25/55) utilizada na camada de desgaste é aproximadamente 5000 MPa, enquanto o ângulo de fase tem o valor de 22,1°.

6.4.6. Comparação dos resultados do módulo de rigidez das várias misturas

Apresenta-se nas Figuras 71 e 72 uma análise comparativa dos valores obtidos para os módulos de rigidez e ângulos de fase das quatro misturas analisadas.

Em relação aos módulos de rigidez, constata-se que estes evoluem, consoante a frequência aplicada, de forma diferente para cada mistura. Relativamente aos valores dos módulos de rigidez das diferentes misturas a uma frequência de 8 Hz (módulo a utilizar no dimensionamento das diferentes estruturas no Capítulo 8), verifica-se que o mais baixo é o da mistura drenante (PA 12,5) com um valor próximo de 3000 MPa, seguido do Betão Betuminoso em camada de desgaste (AC 14 surf 35/50) com um módulo de aproximadamente 4500 MPa, segue-se o Betão Betuminoso Rugoso (AC 14 surf PMB 25/55) com um módulo de cerca de 5000 MPa e, a mistura com um módulo mais elevado é o Macadame Betuminoso (AC 20 base/bin 35/50) com um valor de 5900 MPa.

Relativamente aos ângulos de fase constata-se que as misturas com ligante modificado apresentam valores mais baixos, facto que já seria de esperar devido ao comportamento mais elástico do betume modificado.

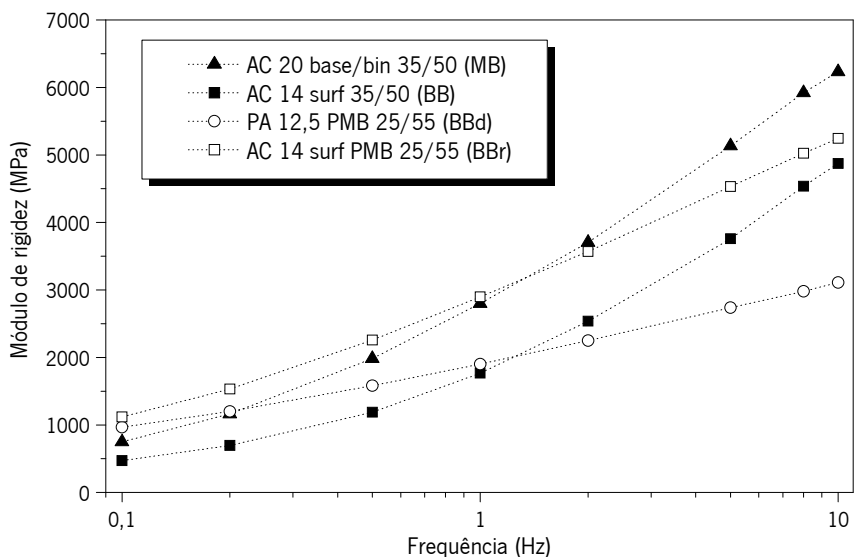


Figura 71 – Módulos de rigidez obtidos para as diferentes misturas estudadas à temperatura de 20 °C

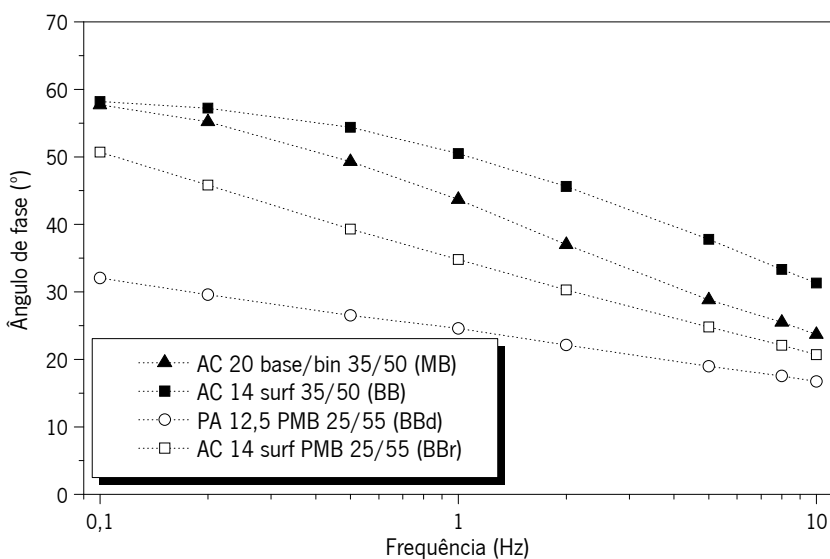


Figura 72 – Ângulo de fase obtidos para as diferentes misturas estudadas à temperatura de 20 °C

CAPÍTULO 7

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DA RESISTÊNCIA AO ROLAMENTO

7.1. Apresentação dos ensaios

A resistência ao rolamento foi avaliada experimentalmente com recurso ao protótipo apresentado no Capítulo 5, e as superfícies ensaiadas foram as dos trechos apresentados no Capítulo 6.

Assim, sobre cada superfície, foram realizados dois ciclos de ensaios nos quais se fez variar a velocidade e a carga aplicada a cada roda. Cada ciclo compreendeu a realização de ensaios a quatro velocidades (5, 10, 15 e 20 km/h) e com 6 níveis possíveis de carga a atuar sobre cada roda (0,70, 0,76, 0,82, 0,88, 0,94 e 1,00 kN). Foram realizados 6 ensaios por dia, à mesma velocidade mas com níveis de carga diferentes, tendo o primeiro nível de carga uma duração de 2 horas e meia, e os restantes níveis a duração de 2 horas cada. No primeiro ciclo de ensaios os níveis de carga eram crescentes, isto é, iniciou-se sempre com a carga mínima (apenas o peso próprio do equipamento) e foram-se sucessivamente adicionando pesos, enquanto no segundo ciclo de ensaios os níveis de carga eram decrescentes, conforme se retiravam sucessivamente os pesos.

No Quadro 20 apresenta-se um resumo das distâncias percorridas por cada roda com a realização dos ensaios referidos, os quais totalizam 4000 km.

Quadro 20 – Distâncias percorridas durante a realização dos ensaios

Velocidade (km/h)	Distância percorrida (km)				
	Superfície A	Superfície B	Superfície C	Superfície D	Total das 4 superfícies
5	125	125	125	125	500
10	250	250	250	250	1000
15	375	375	375	375	1500
20	500	500	-	-	1000
Total	1250	1250	750	750	4000

Como se pode verificar pelos resultados apresentados no Quadro 20, a distância percorrida é proporcional à velocidade de circulação, uma vez que o tempo de ensaio foi mantido constante entre as velocidades avaliadas. Estes 4000 quilómetros percorridos pelo equipamento, num total de 350 horas de funcionamento, permitiram assim determinar as diferenças quer em termos de esforço de torque, quer em termos de consumo de energia, apresentando-se na secção seguinte os resultados obtidos.

Devido a algumas dificuldades verificadas na compactação da mistura betuminosa em laboratório, as quais já foram referidas no Capítulo 6, e que se ficaram a dever a limitações de espaço para circular com o cilindro compactador (Figura 36c), a superfície C ficou com uma ligeira e pontual irregularidade superficial, a qual fazia com que o equipamento, ao circular a 20 km/h não apresentasse um movimento estável. Assim, não havendo certezas de que a sua realização e consideração dos resultados não poria em causa a validade das conclusões, optou-se por não realizar os ensaios a 20 km/h nas superfícies C e D (dado que esta última resultou de uma modificação da anterior).

7.2. Esforço de torque e consumo de energia das superfícies em estudo

Conforme referido anteriormente, o protótipo desenvolvido permite medir o esforço de torque e o consumo de energia necessários para que ocorra a circulação de duas rodas com pneus convencionais de veículos ligeiros, a uma determinada velocidade, sobre as superfícies em estudo. Embora a resistência ao rolamento que ocorre nos veículos se deva a diversos fatores já abordados no Capítulo 3, atendendo às características do equipamento desenvolvido considerou-se, simplificadamente, que as

diferenças do esforço de torque e do consumo de energia se devem apenas à variação da resistência ao rolamento ao circular sobre diferentes superfícies.

Nesse sentido, apresentam-se de seguida os resultados obtidos, para o esforço de torque e consumo de energia, nos ensaios realizados sobre as diferentes superfícies em estudo, a partir dos quais se estabeleceram posteriormente previsões do consumo de combustível imputável à circulação sobre pavimentos rodoviários com diferentes características.

Atendendo à grande quantidade de resultados obtidos, optou-se por apresentar, para cada superfície e condições de ensaio, apenas os valores médios do torque e do consumo de energia dos dois ciclos de ensaio anteriormente referidos, determinados a partir dos valores registados após a sua estabilização, remetendo-se para o Anexo A os resultados individuais de cada ensaio.

7.2.1. Superfície A

Tendo por base o procedimento descrito em 5.6, dos ensaios realizados sobre a superfície A obtiveram-se os resultados apresentados nas Figuras 73 e 74 para o esforço de torque e consumo de energia, respetivamente.

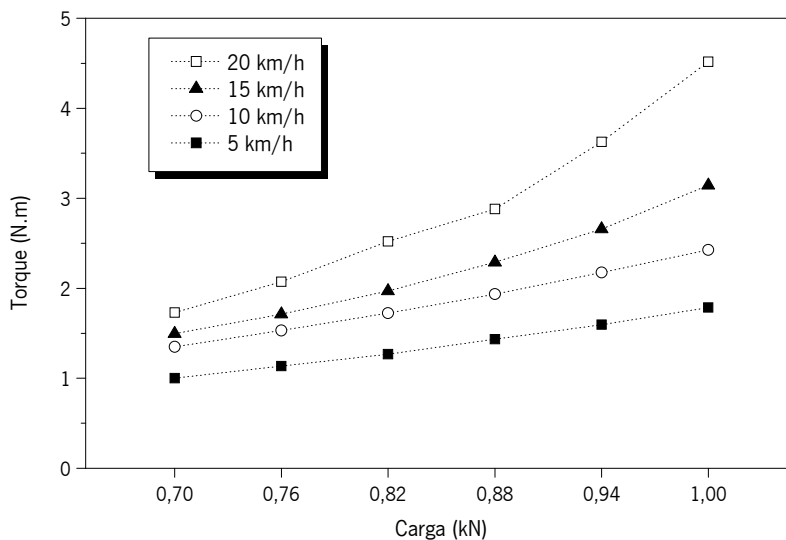


Figura 73 – Média dos valores obtidos para o esforço de torque na superfície A

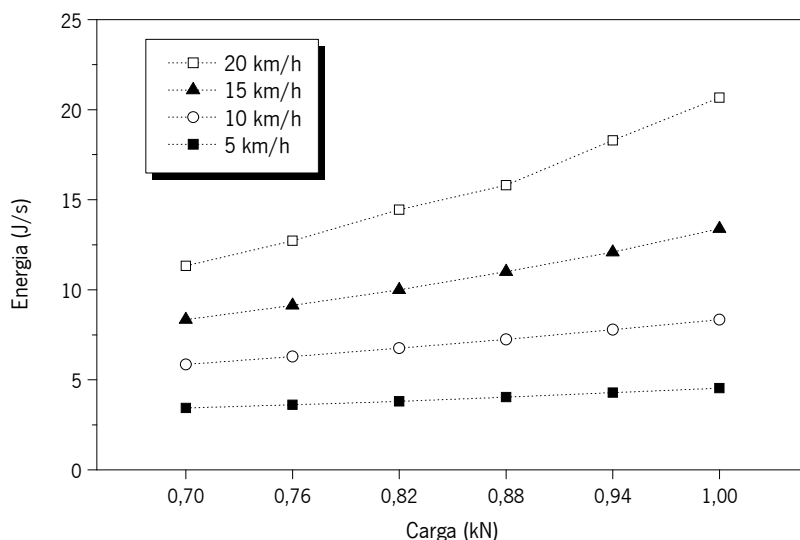


Figura 74 – Média dos valores obtidos para o consumo de energia na superfície A

Conforme se pode verificar pela análise das Figuras 73 e 74, a energia e o esforço de torque necessários para fazer circular as rodas do protótipo sobre a superfície A é proporcional à carga aplicada para velocidades mais baixas. No entanto, para as velocidades mais elevadas, os valores obtidos para essas variáveis seguem uma tendência mais exponencial quando analisadas em função da carga aplicada.

7.2.2. Superfície B

Dos ensaios realizados sobre a superfície B obtiveram-se os resultados apresentados nas Figuras 75 e 76 para o esforço de torque e consumo de energia, respetivamente.

Conforme referido no Capítulo 6, a superfície B tem a mesma base da superfície A, sendo o resultado da sobreposição de um *slurry seal* à mistura anterior, o qual alterou as suas características superficiais. Em termos de tendências verificadas, não são notórias grandes diferenças entre as duas superfícies, verificando-se, no entanto, uma descida generalizada dos valores registados, quer do torque, quer do consumo de energia, para a superfície B. Essa diminuição do esforço necessário para que o movimento do equipamento ocorresse, deverá assim ficar a dever-se à menor rugosidade da superfície B, face à superfície A, devido ao tratamento superficial que lhe foi aplicado.

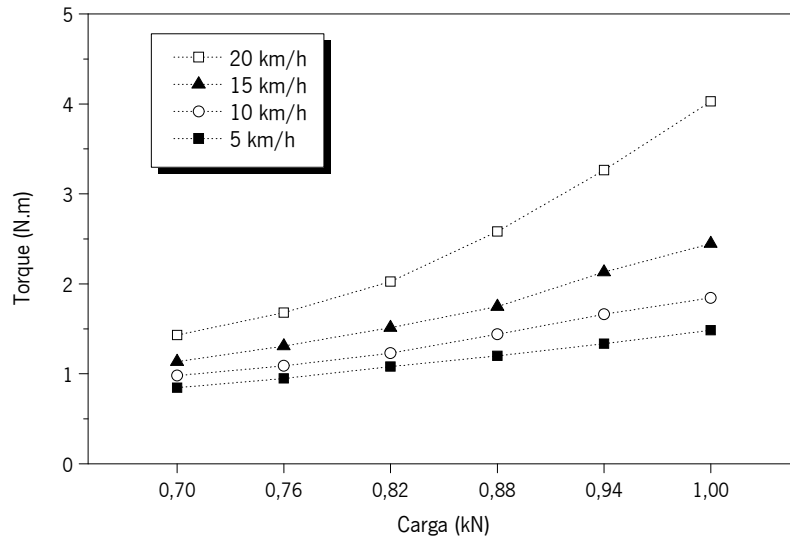


Figura 75 – Média dos valores obtidos para o esforço de torque na superfície B

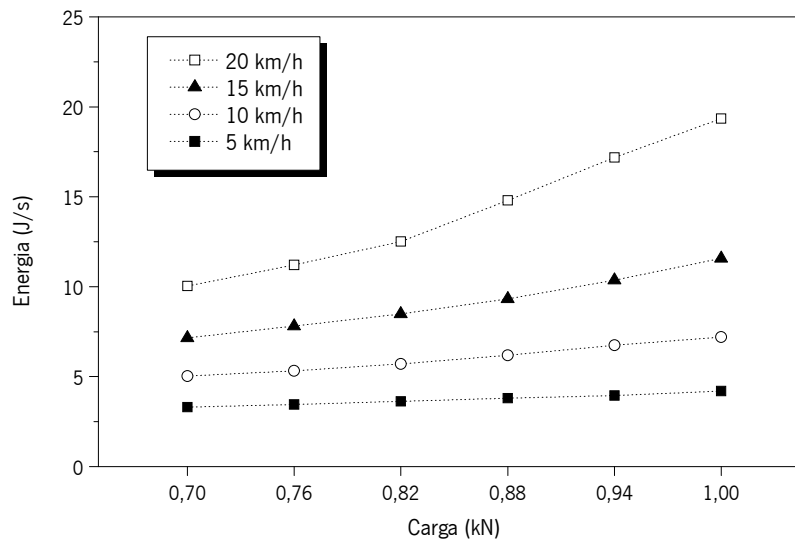


Figura 76 – Média dos valores obtidos para o consumo de energia na superfície B

7.2.3. Superfície C

Dos ensaios realizados sobre a superfície C obtiveram-se os resultados apresentados nas Figuras 77 e 78 para o esforço de torque e consumo de energia, respetivamente.

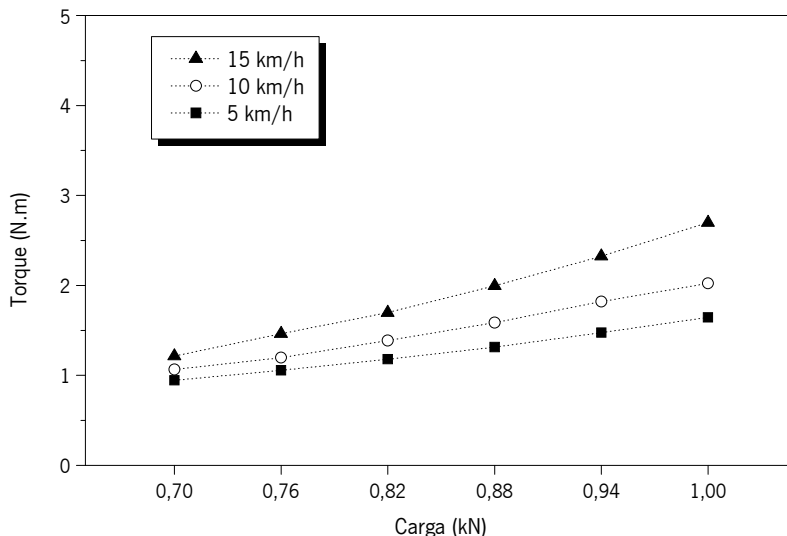


Figura 77 – Média dos valores obtidos para o esforço de torque na superfície C

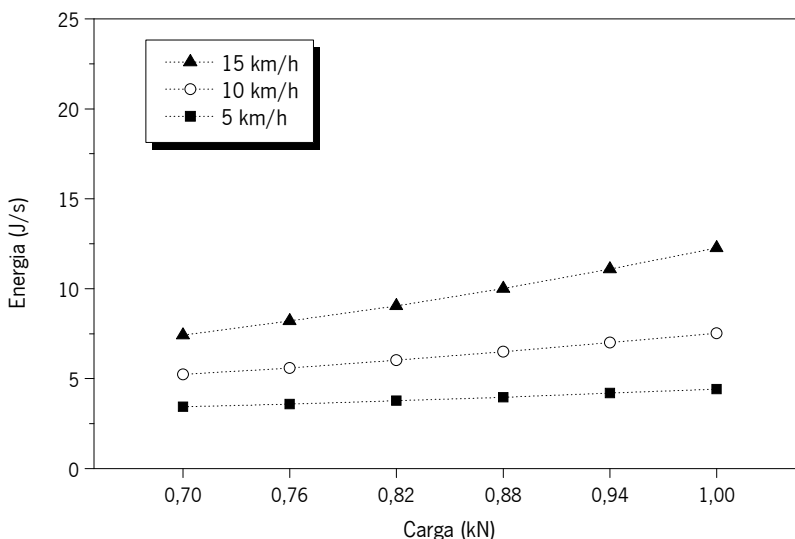


Figura 78 – Média dos valores obtidos para o consumo de energia na superfície C

A análise dos resultados demonstra uma relação linear da energia ou do esforço de torque com a carga aplicada. Essa relação já se verificava na superfície A mas apenas para velocidades mais baixas, começando-se a notar para velocidades mais elevadas (15 e 20 km/h) uma tendência exponencial em função da carga aplicada. Na presente superfície, embora não tenham sido realizados ensaios a 20 km/h, os resultados dos ensaios a 15 km/h continuam a demonstrar uma tendência linear.

7.2.4. Superfície D

Dos ensaios realizados sobre a superfície D obtiveram-se os resultados apresentados nas Figuras 79 e

80 para o esforço de torque e consumo de energia, respetivamente.

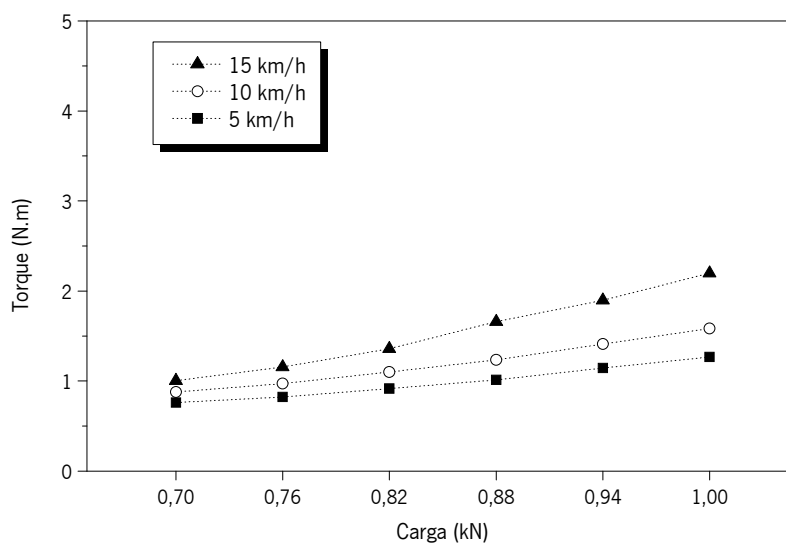


Figura 79 – Média dos valores obtidos para o esforço de torque na superfície D

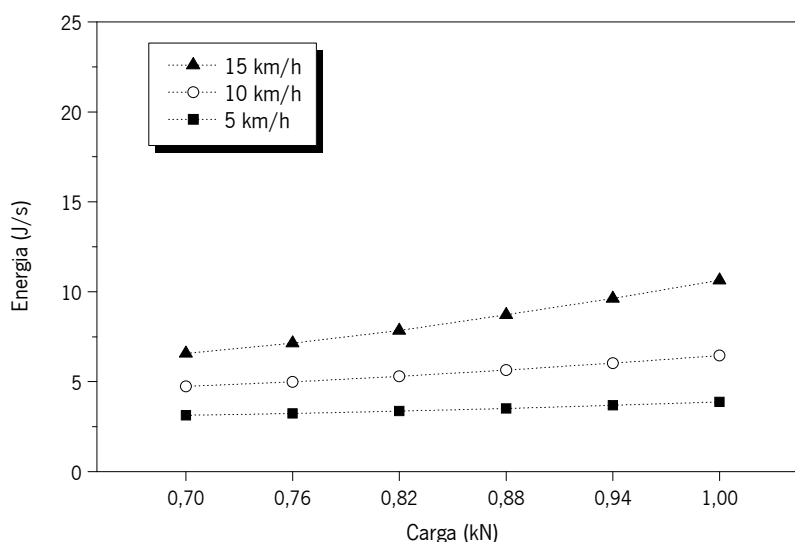


Figura 80 – Média dos valores obtidos para o consumo de energia na superfície D

Sendo esta superfície o resultado de uma alteração da anterior (superfície C) através da sobreposição de uma calda de cimento que preencheu os seus vazios, tornando-a mais regular e menos rugosa, os resultados demonstram efeitos na resistência ao rolamento, com a diminuição do esforço de torque e do consumo de energia, quando comparados com os registados na superfície C.

7.3. Análise dos resultados com recurso a técnicas de *Data Mining*

Do exposto anteriormente, percebe-se que os ensaios realizados permitiram obter diferentes esforços de torque e consumos de energia, devido à circulação do equipamento sobre as superfícies de pavimento em estudo. Essas diferenças do torque e do consumo de energia são consequência da alteração das condições de ensaio, isto é, da velocidade de circulação do equipamento e da carga imposta a cada roda, bem como das características das superfícies, isto é, do atrito existente entre o pneu e o pavimento (considerado através do valor do PTV) e da textura da superfície do pavimento (considerada através dos valores de ETD e MTD).

A fim de verificar a sua interdependência, começou-se por proceder à avaliação das correlações existentes entre as variáveis independentes através do coeficiente de correlação de *Pearson* (R), apresentando-se os resultados no Quadro 21.

Quadro 21 – Matriz de correlação das variáveis independentes (R)

Parâmetro	PTV	ETD	MTD	Velocidade	Carga
PTV	1,000				
ETD	0,694	1,000			
MTD	0,759	0,958	1,000		
Velocidade	0,068	0,112	0,170	1,000	
Carga	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000

De acordo com os resultados apresentados no Quadro 21, há uma boa correlação entre os parâmetros de textura (ETD e MTD) e relações significativas entre o PTV e cada um dos parâmetros da textura. Já as outras relações são muito pobres, sendo a velocidade fracamente correlacionável com os outros parâmetros e não existindo qualquer relação entre a carga e cada um dos parâmetros restantes. Assim, é necessário recorrer a vários parâmetros de entrada para estimar adequadamente a energia e o torque. Como este é um problema complexo que envolve vários parâmetros com relações complexas considerou-se importante recorrer a ferramentas de inteligência artificial em vez de ferramentas estatísticas tradicionais.

De forma a avaliar a consistência dos resultados obtidos procedeu-se à sua análise com recurso a técnicas de prospeção/mineração de dados (conhecidas na terminologia anglo-saxónica por *Data Mining*), sendo várias as definições aceites para este termo. Azevedo e Santos (2005), por exemplo, definem *Data Mining* como sendo a aplicação de métodos e técnicas em grandes bases de dados, para encontrar tendências ou padrões com o intuito de descobrir conhecimento. Existem várias técnicas de *Data Mining*, podendo referir-se, a título de exemplo, as árvores de regressão, as regressões múltiplas, as redes neuronais, as máquinas de vetores de suporte e os k-vizinhos mais próximos. Tendo em conta as suas capacidades de aprendizagem não-lineares, no presente trabalho recorreu-se à utilização de redes neuronais artificiais e de máquinas de vetores de suporte.

Para testar a capacidade preditiva das técnicas de *Data Mining* foi necessário dividir o conjunto de dados em dois subconjuntos: o conjunto de treino, composto por 144 registos, e o conjunto de teste, composto por 72. O modelo foi treinado usando o conjunto de treino, com um esquema de validação cruzada em que os dados foram divididos em dez subconjuntos de igual tamanho. Nove subconjuntos foram usados para ajustar o modelo, ao passo que o subconjunto restante foi utilizado para testar o modelo. Este processo foi repetido até que todos os subconjuntos tivessem sido testados, isto é, realizaram-se dez séries deste processo.

O modelo com o melhor desempenho no processo de treino foi depois equipado com todo o conjunto de dados de treino e foi testado utilizando o conjunto de dados de teste composto pelos 72 registos não utilizados no processo de formação do modelo.

O desempenho dos modelos foi depois avaliado usando o coeficiente de determinação (R^2), a raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSE - *Root Mean Square Error*) e o desvio absoluto médio (MAD - *Mean Absolute Deviation*). Os valores de RMSE e MAD são definidos, respetivamente, pelas Equações 16 e 17:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (16)$$

$$MAD = \frac{1}{N} \times \sum_{i=1}^N |y_i - \hat{y}_i| \quad (17)$$

onde y_i é o valor medido, \hat{y}_i é o valor previsto e N é o número de amostras.

Quanto maior for o R^2 , melhor o desempenho do modelo, ao passo que, quanto menores os valores de RMSE e MAD, melhor a capacidade preditiva do modelo.

7.3.1. Previsão do consumo de energia e esforço de torque com recurso a Redes Neurais Artificiais

Começou-se então por prever o consumo de energia e o esforço de torque necessários para o equipamento circular sob diferentes condições nos quatro pavimentos em estudo, utilizando a técnica de *Data Mining*, redes neurais artificiais (RNA). Os cálculos foram efetuados em ambiente *R* (R Development Core Team, 2011) com recurso à biblioteca *RMiner* desenvolvida por Cortez (2015), a qual inclui um conjunto de funções que tornam mais fácil a utilização de técnicas de *Data Mining* em ambiente *R*.

As redes neurais artificiais (RNA) são uma técnica computacional que tenta imitar, de maneira simplificada, a estrutura e funcionamento do cérebro humano. Esta técnica apresenta um alto desempenho na modelação de problemas complexos não-lineares multivariáveis e é particularmente útil para problemas onde não há conhecimento da relação entre as variáveis. Estas redes são constituídas por unidades de processamento (nodos ou neurónios), os quais estão altamente interligados (Martins e Almeida, 2009).

Os nodos comunicam entre si enviando sinais através de ligações. Cada ligação liga dois nodos com uma dada intensidade, fornecida pelo peso da ligação $W_{i,j}$ (i e j são nodos), e cada nodo tem uma função de ativação que introduz uma componente de não-linearidade no processo computacional. No presente estudo os pesos foram gerados aleatoriamente no intervalo $[-0,7; 0,7]$ e foi usada a função de ativação logística f dada por $1/(1+e^{-x})$. O modelo geral é dado pela Equação 18 (Hastie *et al.*, 2001):

$$\hat{y} = w_{o,0} + \sum_{j=I+1}^{o-1} f\left(\sum_{i=1}^I x_i w_{j,i} + w_{j,0}\right) w_{o,i} \quad (18)$$

onde x_i são os parâmetros de entrada ou nodos, I é o número de parâmetros de entrada (*inputs*) e o é o parâmetro de saída (*output*).

Neste trabalho a arquitetura adotada foi a do perceptrão multicamadas (Haykin, 1998), com uma camada oculta (Figura 81). De forma a otimizar a análise foi utilizada uma busca de rede de entre as seguintes possibilidades para o número de nodos escondidos: {0, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20}.

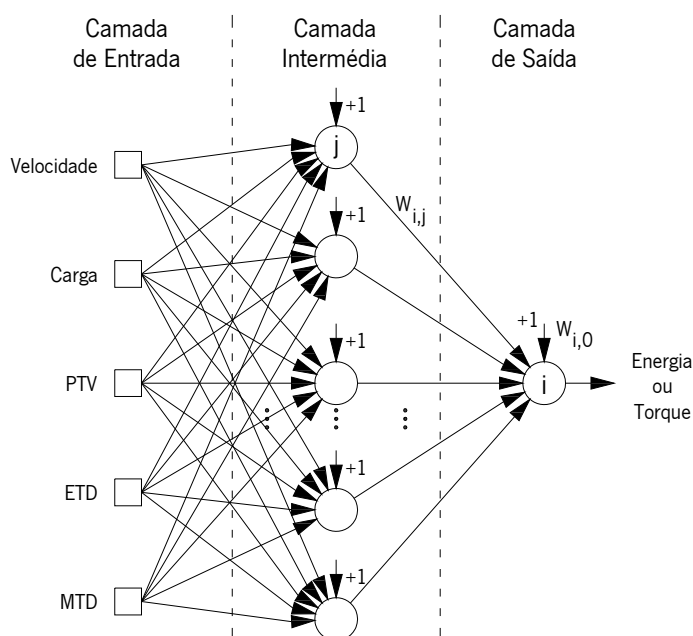


Figura 81 – Exemplo da arquitetura do perceptrão multicamadas (adaptado de Cortez (2010))

- Previsão do consumo de energia

Inicialmente consideraram-se as cinco variáveis de entrada (velocidade, carga, PTV, ETD e MTD) a fim de prever a energia, tendo-se denominado este modelo de RNA_M5E. O conjunto dos dados de treino foi dividido em dez subconjuntos, sendo nove para treino e um para teste. Este processo foi repetido até que todos os subconjuntos tivessem sido testados e, no final, o modelo com melhor desempenho foi ajustado com todo o conjunto de treino, sendo o resultado apresentado na Figura 82 (a), enquanto a Figura 82 (b) apresenta os resultados obtidos para a aplicação desse modelo ao conjunto de teste. Ambos os gráficos confirmam a elevada capacidade de previsão do consumo de energia pelo modelo de RNA considerado, uma vez que os valores da energia medida e da energia prevista são praticamente coincidentes (concentrando-se sobre a reta diagonal dos gráficos). Importa ressaltar uma vez mais que os valores de teste são totalmente desconhecidos para os modelos de *Data Mining*, pelo que esta compatibilidade dos resultados comprova a elevada capacidade do modelo considerado para efetuar as respetivas previsões.

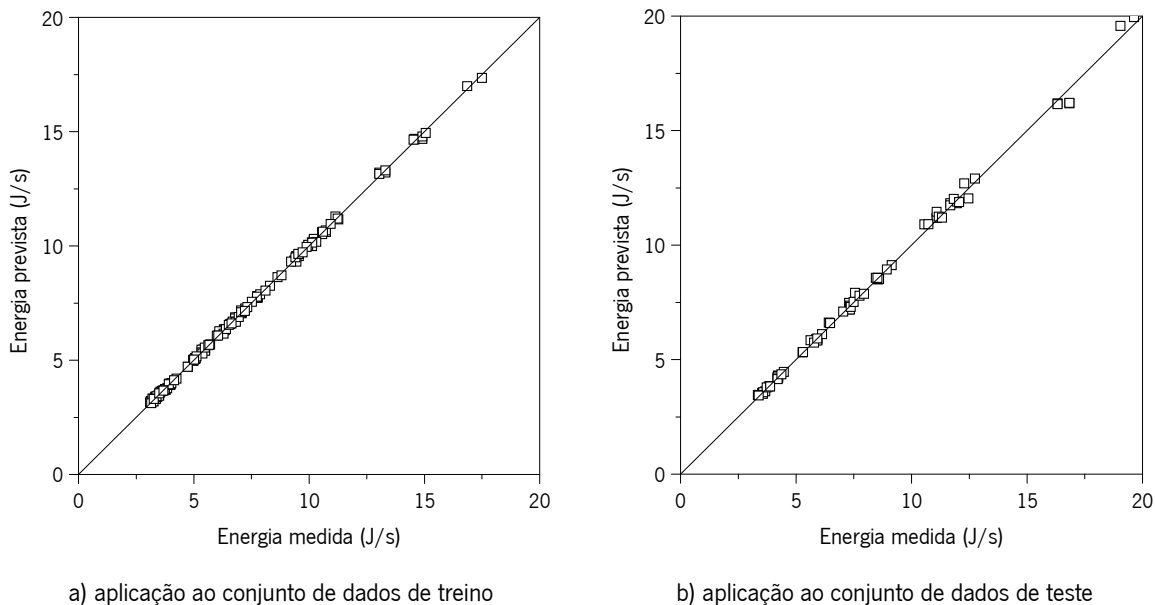


Figura 82 – Resultados da utilização do modelo RNA_M5E

Aplicou-se de seguida um método de análise de sensibilidade para medir a importância de cada parâmetro desenvolvido por Kewley *et al.* (2000). Esta análise foi efetuada para avaliar a resposta do modelo face a alterações de cada um dos parâmetros de entrada. Assim, para avaliar a importância de um parâmetro de entrada fez-se variar o seu valor desde o valor mínimo até ao valor máximo, enquanto os restantes parâmetros de entrada mantêm os seus valores médios. A importância de um parâmetro de entrada é medida pela variação induzida na saída do modelo, sendo que um parâmetro com uma forte influência no modelo induz uma grande variação nos dados de saída, enquanto um parâmetro com baixa importância induz uma pequena variação.

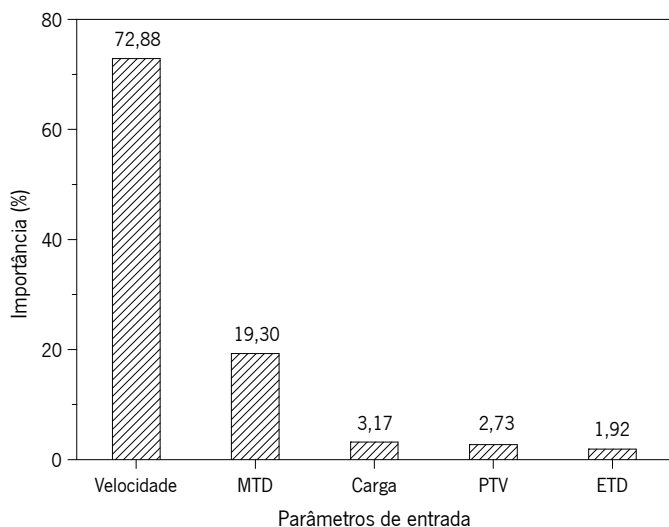


Figura 83 – Importância atribuída pelo modelo RNA_M5E a cada parâmetro de entrada, na previsão do consumo de energia

Na sequência dessa análise obtiveram-se os resultados apresentados na Figura 83, a qual mostra, claramente, a grande influência da velocidade na previsão da energia.

A seguir à velocidade surge a profundidade média da textura (MTD), como a segunda mais importante, apresentando também uma influência significativa. Segue-se depois a carga, o coeficiente de atrito pontual (PTV) e a profundidade estimada da textura (ETD), os três com influências bastante baixas. De facto, esperar-se-ia uma maior influência destes três parâmetros. Há uma grande diferença em termos da importância atribuída ao MTD e ao ETD, ambos relacionados com a textura do pavimento e com uma forte correlação entre si ($R = 0,958$), no entanto, pode ser precisamente essa a razão para a atribuição de uma pequena importância ao ETD pelo modelo.

Uma vez que a soma das importâncias atribuídas à velocidade, ao MTD e à carga é superior a 95 por cento, realizou-se outra análise considerando apenas estes três parâmetros de entrada, tendo-se denominado este modelo de RNA_M3E. À semelhança dos gráficos apresentados para o modelo RNA_M5E, na Figura 84 apresentam-se os resultados obtidos para a aplicação do modelo RNA_M3E aos conjuntos de dados de treino e de teste.

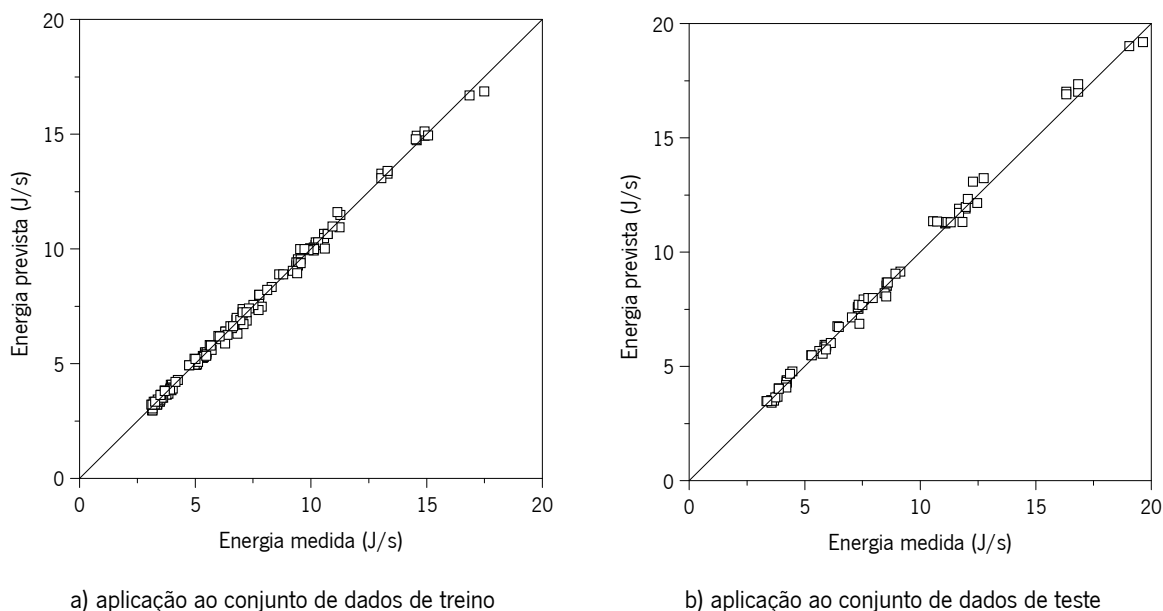


Figura 84 – Resultados da utilização do modelo RNA_M3E

Os gráficos da Figura 84 mostram ter existido uma redução da precisão deste modelo face ao anterior, no entanto, o modelo RNA_M3E mantém um bom desempenho na previsão do consumo de energia.

Tendo em conta a grande influência que a velocidade apresentava sobre a energia consumida (Figura 83), foi realizada ainda uma análise utilizando apenas a velocidade como parâmetro de entrada, tendo-se denominado este modelo de RNA_M1E. Os resultados apresentados na Figura 85 mostram que, neste caso, o modelo de RNA já não tem um desempenho satisfatório.

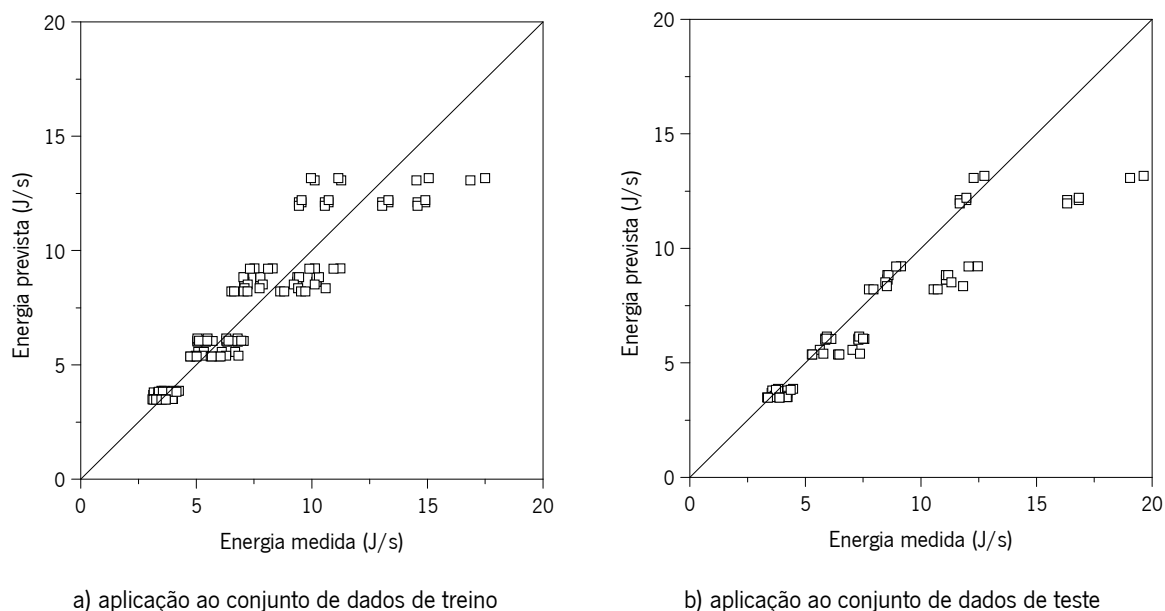


Figura 85 – Resultados da utilização do modelo RNA_M1E

Os valores do coeficiente de determinação (R^2), da raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSE) e do desvio absoluto médio (MAD), obtidos durante o processo de treino, são apresentados no Quadro 22.

Quadro 22 – Métricas obtidas na avaliação do desempenho dos modelos de RNA na previsão do consumo de energia, durante o processo de treino

Métrica	Modelo RNA_M5E	Modelo RNA_M3E	Modelo RNA_M1E
R^2	0,998	0,990	0,836
RMSE	0,162	0,337	1,341
MAD	0,112	0,217	0,992

Os valores apresentados no Quadro 22 corroboram as conclusões já apresentadas na sequência da análise gráfica dos resultados obtidos para os 3 modelos de RNA considerados. Com efeito, o modelo RNA_M5E, o qual considera 5 parâmetros de entrada, apresenta um valor de R^2 bastante elevado

(muito próximo de 1) e valores de RMSE e MAD bastante baixos. Com a redução de 5 para 3 parâmetros de entrada, isto é, com a utilização do modelo RNA_M3E, o erro já aumentou ligeiramente, isto é, o valor de R^2 diminuiu (embora continue muito próximo de 1) e os valores de RMSE e MAD aumentaram, no entanto, este modelo continua mesmo assim a apresentar um bom desempenho na previsão do consumo de energia. Já a utilização do modelo RNA_M1E, o qual considera apenas 1 parâmetro de entrada, levou a uma redução do valor de R^2 e a um aumento considerável dos valores de RMSE e MAD, demonstrando assim a baixa capacidade de previsão da energia por parte deste modelo.

- Previsão do esforço de torque

De forma a prever-se o esforço de torque, à semelhança do realizado na previsão do consumo de energia, começou-se por considerar as cinco variáveis de entrada (velocidade, carga, PTV, ETD e MTD), tendo-se denominado este modelo de RNA_M5T. Tal como já foi referido na previsão do consumo de energia, também aqui se dividiu o conjunto dos dados de treino em dez subconjuntos, sendo nove para treino e um para teste. Este processo foi repetido até que todos os subconjuntos tivessem sido testados e, no final, o modelo com melhor desempenho foi ajustado com todo o conjunto de treino, sendo o resultado apresentado na Figura 86 (a), enquanto a Figura 86 (b) apresenta os resultados obtidos para a aplicação desse modelo ao conjunto de teste. Ambas as figuras confirmam a elevada capacidade de previsão do esforço de torque pelo modelo de RNA, sendo os valores do torque medido e previsto praticamente coincidentes.

De forma análoga ao realizado para os modelos de RNA para previsão do consumo de energia, aplicou-se também aos modelos de previsão do esforço de torque um método de análise de sensibilidade, desenvolvido por Kewley *et al.* (2000), para medir a importância de cada parâmetro, avaliando-se assim a resposta do modelo face a alterações de cada um dos parâmetros de entrada.

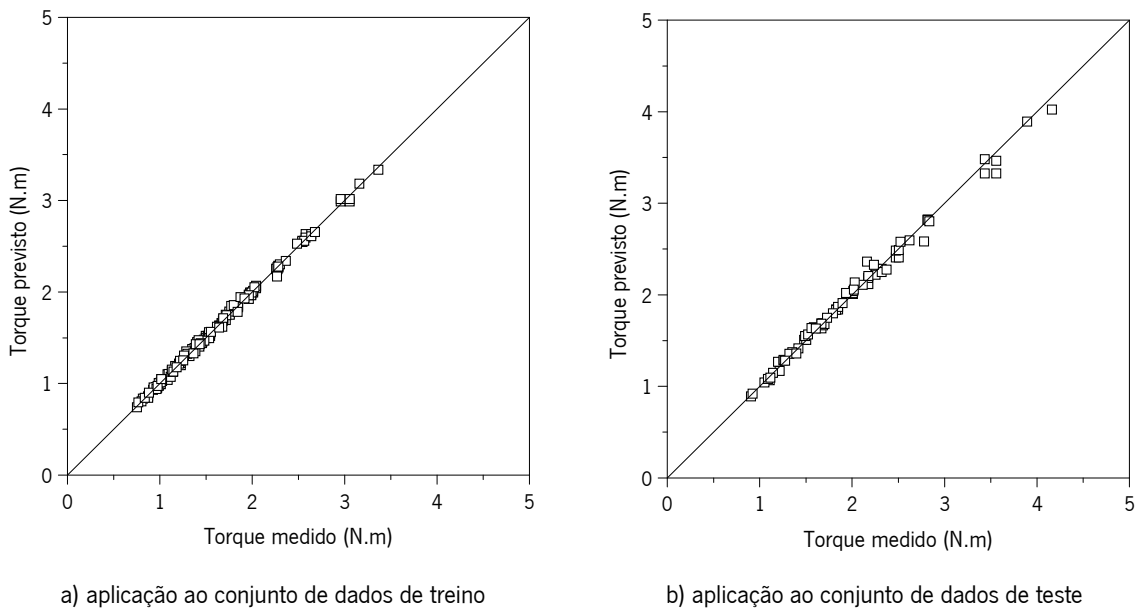


Figura 86 – Resultados da utilização do modelo RNA_M5T

Na sequência dessa análise obtiveram-se os resultados apresentados na Figura 87. Comparando estes resultados com os da Figura 83 (relativa ao modelo de previsão do consumo de energia), constata-se que existe uma perda bastante significativa da influência da velocidade, sendo a previsão do esforço de torque influenciada essencialmente pelas características superficiais dos pavimentos (MTD, ETD e PTV).

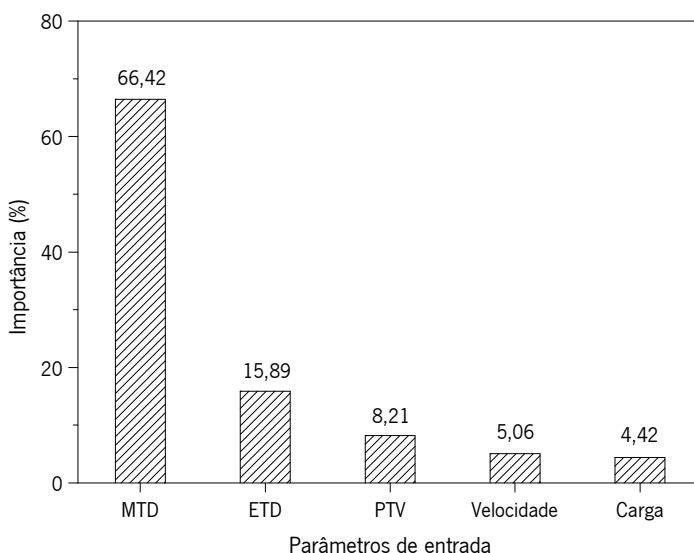


Figura 87 – Importância atribuída pelo modelo RNA_M5T a cada parâmetro de entrada, na previsão do esforço de torque

No caso da previsão do esforço de torque, a profundidade média da textura (MTD) surge como o parâmetro mais influente, seguida da profundidade estimada da textura (ETD) e do coeficiente de atrito pontual (PTV). A velocidade, que no modelo de previsão do consumo de energia apresentava uma importância de quase 73%, tem na previsão do esforço de torque a influência reduzida para pouco mais de 5%, apenas seguida da carga que surge como o parâmetro menos importante.

Embora, de uma forma geral, as diferenças relativas entre as importâncias de cada um dos parâmetros tenham diminuído, os três parâmetros mais influentes na previsão do esforço de torque apresentam, ainda assim, uma importância superior a 90 por cento. Por essa razão, e à semelhança do estudo efetuado para o consumo de energia, realizou-se outra análise considerando apenas estes três parâmetros de entrada (MTD, ETD e PTV), tendo-se denominado este modelo de RNA_M3T. Na Figura 88 apresentam-se os resultados obtidos para a aplicação do modelo RNA_M3T aos conjuntos de dados de treino e de teste. No entanto, estes demonstram que o modelo em questão apresenta um desempenho claramente insuficiente na previsão do esforço de torque.

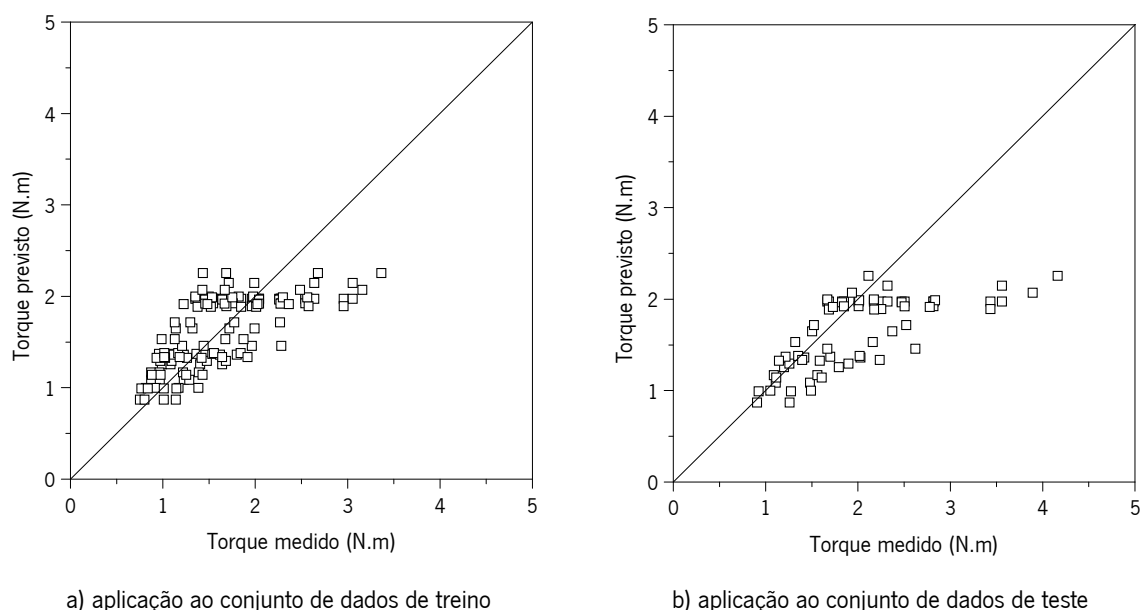


Figura 88 – Resultados da utilização do modelo RNA_M3T

Os valores do coeficiente de determinação (R^2), da raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSE) e do desvio absoluto médio (MAD), obtidos durante o processo de treino, são apresentados no Quadro 23.

Quadro 23 – Métricas obtidas na avaliação do desempenho dos modelos de RNA na previsão do esforço de torque, durante o processo de treino

Métrica	Modelo RNA_M5T	Modelo RNA_M3T
R ²	0,990	0,342
RMSE	0,055	0,462
MAD	0,038	0,379

Os valores apresentados no Quadro 23 confirmam as conclusões resultantes da análise gráfica dos resultados obtidos para os 2 modelos de RNA considerados. O modelo RNA_M5T (que considera 5 parâmetros de entrada) apresenta um valor de R² muito próximo de 1 e valores de RMSE e MAD próximos de zero. A redução de 5 para 3 parâmetros de entrada (modelo RNA_M3T) provoca uma diminuição considerável do R² e aumentos das métricas RMSE e MAD, evidenciando a baixa capacidade deste modelo para prever o esforço de torque.

7.3.2. Previsão do consumo de energia e do esforço de torque com recurso a Máquinas de Vetores de Suporte

No presente estudo recorreu-se então à técnica de *Data Mining* máquinas de vetores de suporte (MVS), as quais podem ser utilizadas para tarefas de classificação e regressão. Estas técnicas foram inicialmente desenvolvidas por Cortes e Vapnik (1995) para tarefas de classificação. As tarefas de regressão só se tornariam possíveis com a introdução da função de perda ϵ -insensível (Smola e Schölkopf, 2004). As MVS são sistemas de aprendizagem que utilizam um espaço de hipóteses de funções lineares num amplo espaço de características, as quais são treinadas com um algoritmo de otimização que implementa uma tendência de aprendizagem estatística (Cortes e Vapnik, 1995). A ideia básica é transformar o *input* $x \in \mathcal{R}^l$ num grande espaço característico m -dimensional, usando um mapeamento não linear. Então, a MVS procura o melhor hiperplano de separação linear, relativo a um conjunto de vetores de suporte, no espaço característico (Figura 89), estando a transformação dependente da função de Kernel ($k(x,y) = \sum \theta_i(x)\theta_i(y)$) adotada (Martins e Almeida, 2009).

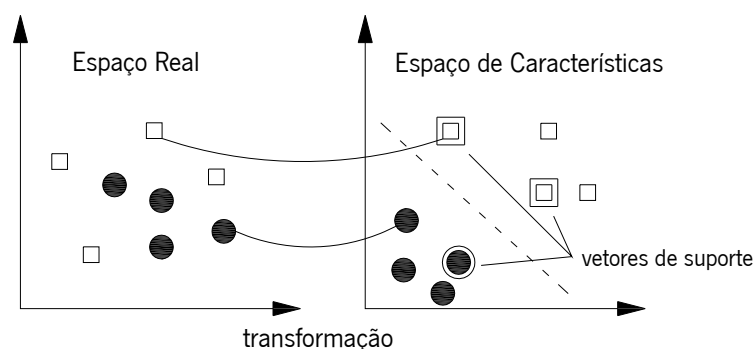


Figura 89 – Exemplo de uma transformação MVS (adaptado de Cortez (2010))

No presente estudo será utilizada a função Kernel Gaussiana:

$$k(x, x') = e^{(-\gamma \cdot \|x - x'\|^2)}, \quad \gamma > 0 \quad (19)$$

À semelhança do estudo com Redes Neurais Artificiais, os cálculos foram efetuados em ambiente *R* com recurso à biblioteca *RMiner* desenvolvida por Cortez (2015), no entanto, ao contrário do estudo anterior, neste decidiu-se utilizar várias combinações de parâmetros de entrada (PTV, ETD, MTD, velocidade e carga), a fim de prever o consumo de energia e o torque. Os modelos que consideram três parâmetros de entrada foram designados de MVS_M3, os modelos com quatro parâmetros de entrada foram designados de MVS_M4 e o modelo que considera todas os parâmetros de entrada foi designado de MVS_M5.

Uma vez que com a realização destes ensaios se pretendia estudar sobretudo a influência das características superficiais dos pavimentos na resistência ao rolamento, os parâmetros velocidade e carga foram considerados em todos os modelos, fazendo-se variar apenas a inclusão dos parâmetros relativos às características superficiais (PTV, ETD e MTD). Assim, foram considerados três modelos MVS_M3 (com três parâmetros de entrada), sendo que cada um deles considerava, além da velocidade e da carga, um dos parâmetros relativos às características superficiais. Da mesma forma, também os modelos com quatro parâmetros de entrada (MVS_M4) apresentavam três combinações possíveis, as quais contemplavam a velocidade, a carga e dois dos parâmetros relativos às características superficiais. As combinações consideradas e as designações dos respetivos modelos são apresentadas no Quadro 24, seguindo-se os resultados com elas obtidos na previsão do consumo de energia e do esforço de torque.

Quadro 24 – Parâmetros de entrada considerados em cada um dos modelos MVS

Modelo	Parâmetros de entrada considerados
MVS_M3_1	Velocidade, carga e PTV
MVS_M3_2	Velocidade, carga e ETD
MVS_M3_3	Velocidade, carga e MTD
MVS_M4_1	Velocidade, carga, ETD e MTD
MVS_M4_2	Velocidade, carga, PTV e ETD
MVS_M4_3	Velocidade, carga, PTV e MTD
MVS_M5	Velocidade, carga, PTV, ETD e MTD

- Previsão do consumo de energia

Os valores do coeficiente de determinação (R^2), da raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSE) e do desvio absoluto médio (MAD), obtidos durante o processo de treino, são apresentados no Quadro 25.

Quadro 25 – Métricas obtidas na avaliação do desempenho dos modelos MVS na previsão do consumo de energia, durante o processo de treino

Métrica	MVS_M3			MVS_M4			MVS_M5
	MVS_M3_1	MVS_M3_2	MVS_M3_3	MVS_M4_1	MVS_M4_2	MVS_M4_3	MVS_M5_1
R^2	0,996	0,984	0,986	0,987	0,992	0,993	0,996
RMSE	0,221	0,443	0,410	0,386	0,301	0,275	0,303
MAD	0,159	0,253	0,240	0,226	0,180	0,166	0,180

Analisando o Quadro 25, conclui-se que o modelo que melhor consegue prever a energia é o modelo MVS_M3_1 e só inclui três parâmetros de entrada (velocidade, carga e PTV). A Figura 90 apresenta a relação entre os valores do consumo de energia medidos experimentalmente e os previstos através deste modelo, sendo que a Figura 90 (a) é relativa à sua aplicação ao conjunto dos dados de treino e a Figura 90 (b) ao conjunto dos dados de teste, o qual é completamente desconhecido do modelo.

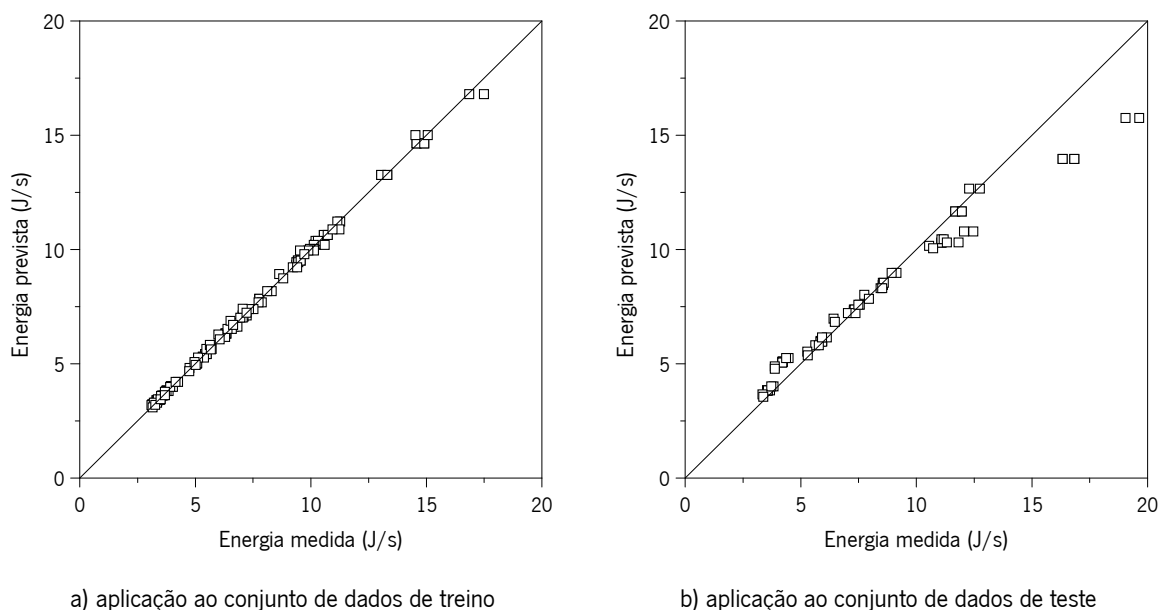


Figura 90 – Resultados da utilização do modelo MVS_M3_1 na previsão do consumo de energia

Atribuindo uma maior importância aos resultados obtidos com o conjunto de dados de teste (Figura 90b), por serem desconhecidos do modelo, pode dizer-se que o modelo apresenta uma capacidade preditiva elevada para valores de energia de até 15 J/s. Para valores superiores a 15 J/s, os valores previstos são inferiores aos valores medidos.

- Previsão do esforço de torque

Relativamente ao torque, procederam-se a análises semelhantes às efetuadas para o consumo de energia, apresentando-se no Quadro 26 os resultados do R², RMSE e MAD obtidos para cada modelo.

Quadro 26 – Métricas obtidas na avaliação do desempenho dos modelos MVS na previsão do esforço de torque, durante o processo de treino

Métrica	MVS_M3			MVS_M4			MVS_M5
	MVS_M3_1	MVS_M3_2	MVS_M3_3	MVS_M4_1	MVS_M4_2	MVS_M4_3	MVS_M5_1
R ²	0,984	0,790	0,886	0,912	0,981	0,986	0,979
RMSE	0,072	0,259	0,193	0,169	0,079	0,068	0,082
MAD	0,050	0,202	0,139	0,127	0,054	0,046	0,053

De entre todas as combinações apresentadas, no caso da previsão do esforço de torque, o melhor

desempenho foi obtido pelo modelo MVS_M4_3, que considera quatro parâmetros de entrada (velocidade, carga, PTV e MTD). As relações entre os valores medidos e os previstos por este modelo são apresentadas na Figura 91. À semelhança do que aconteceu na previsão do consumo de energia com esta técnica, a capacidade de previsão do esforço de torque por esse modelo é elevada para todo o conjunto de dados de treino. No entanto, para o conjunto de dados de teste, apenas apresenta uma boa capacidade para valores de torque até 2,5 Nm.

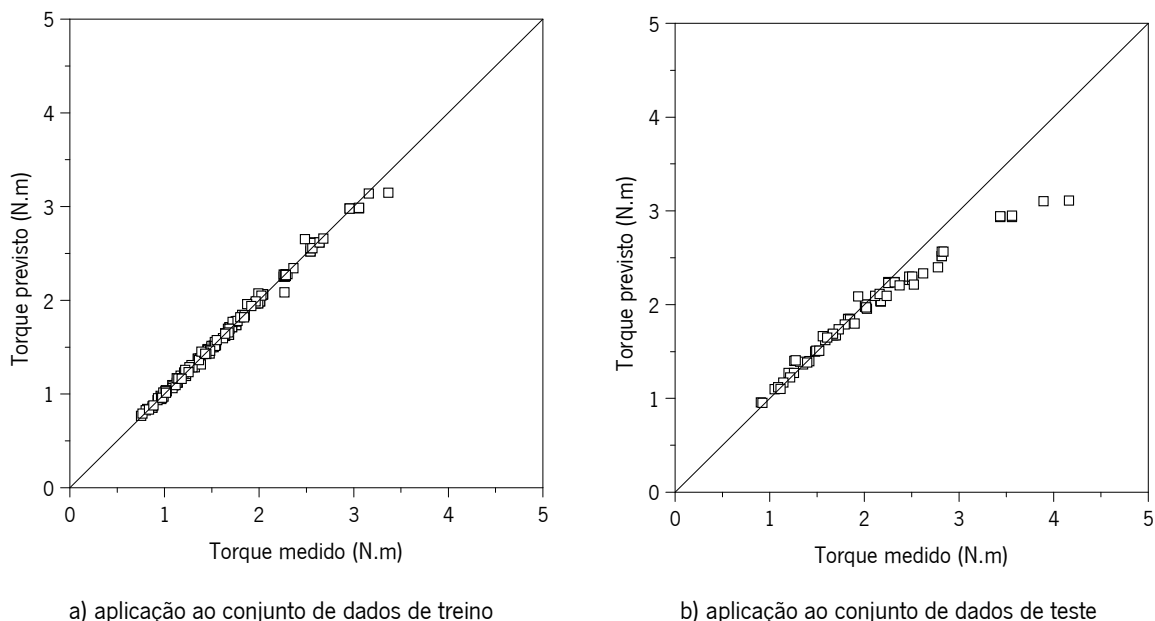


Figura 91 – Resultados da utilização do modelo MVS_M4_3 na previsão do esforço de torque

7.3.3. Conclusões da aplicação das técnicas de *Data Mining* aos resultados obtidos experimentalmente

A aplicação das técnicas de *Data Mining*, Redes Neurais Artificiais e Máquinas de Vetores de Suporte, aos resultados obtidos através do protótipo permitiu desenvolver modelos com grande capacidade de previsão, tanto do esforço de torque como do consumo de energia. Contudo, dos modelos desenvolvidos com recurso a Máquinas de Vetores de Suporte, aqueles que apresentavam melhor desempenho para o conjunto de dados de treino, quando aplicados ao conjunto de dados de teste, viram a sua capacidade de previsão diminuir consideravelmente a partir de 2,5 Nm de esforço de torque ou 15 J/s no consumo de energia. Porém, ao contrário destes, dos modelos desenvolvidos através de Redes Neurais Artificiais, os que consideravam os cinco *inputs* (velocidade, carga, MTD, PTV e ETD) apresentam uma capacidade de previsão muito elevada para todo o conjunto de dados de

teste. Embora se possa considerar que, de uma forma geral, os modelos desenvolvidos apresentam uma boa capacidade de previsão dos resultados, estes modelos (RNA_M5E e RNA_M5T) destacam-se pelo seu elevado desempenho, com valores de R^2 de 0,998 e de 0,993 quando aplicados aos conjuntos de dados de teste na previsão do consumo de energia e do torque, respetivamente.

7.4. Extrapolação para valores reais através dos modelos de *Data Mining* desenvolvidos

Tendo em conta o elevado desempenho dos modelos RNA_M5E e RNA_M5T na previsão do consumo de energia e do esforço de torque, respetivamente, optou-se pela sua utilização para estimar as diferenças de consumo de energia decorrentes da circulação de veículos reais sobre determinados pavimentos. Para tal, previu-se (extrapolando) o consumo de energia correspondente a níveis de carga mais elevados (3kN), equivalentes a cargas por eixo de veículos reais, e às velocidades habitualmente praticadas nas nossas estradas (entre 50 e 90 km/h). Os *inputs* relativos às características dos pavimentos (MTD, PTV e ETD) foram determinados com base nos valores de um vasto conjunto de resultados de caracterização superficial que têm sido realizados pelo Laboratório de Pavimentos do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, no âmbito de diversos trabalhos de investigação passados e em curso. Para tal, e de forma a integrar esses resultados nas análises apresentadas no Capítulo 8, extrapolou-se o consumo de energia para quatro camadas de desgaste: mistura convencional de Betão Betuminoso (AC 14 surf (BB)), Betão Betuminoso Drenante (PA 12,5 (BBd)), Betão Betuminoso Rugoso (AC 14 surf (BBr)) e Microaglomerado Betuminoso a Frio.

No Quadro 27 apresentam-se os valores dos *inputs* considerados nas extrapolações de consumo de energia em condições reais de circulação.

Quadro 27 – *Inputs* relativos às características dos pavimentos considerados nas extrapolações de consumos de energia em condições de circulação real

Camada de desgaste	PTV	ETD	MTD
Betão Betuminoso (AC 14 surf (BB))	66	0,716	0,637
Betão Betuminoso Drenante (PA 12,5 (BBd))	68	1,578	1,408
Betão Betuminoso Rugoso (AC 14 surf (BBr))	68	1,383	1,229
Microaglomerado Betuminoso a Frio	67	1,006	0,898

Da realização das diferentes combinações dos *inputs* e respectivas extrapolações do consumo de energia imputável à circulação nessas condições, obtiveram-se os resultados apresentados no Quadro 28.

Quadro 28 – Extrapolação do consumo de energia em condições de circulação real

Camada de desgaste	Consumo de energia (J/s)				
	50 km/h	60 km/h	70 km/h	80 km/h	90 km/h
AC 14 surf 35/50	27,82	27,96	28,02	28,05	28,03
Betão Betuminoso Drenante	28,39	28,57	28,74	28,89	28,98
Betão Betuminoso Rugoso	28,01	28,18	28,35	28,48	28,56
Microaglomerado Betuminoso a Frio	27,84	28,00	28,12	28,19	28,20

Face aos resultados obtidos, o pavimento construído com uma camada de desgaste constituída por uma mistura AC 14 surf (BB) será aquele que obrigará a um menor dispêndio de energia (combustível) para a circulação dos veículos sobre o mesmo. Tomando essa superfície como referência, a circulação sobre a mistura drenante conduzirá em média a um aumento no consumo de energia de 2,63%, a circulação sobre o Betão Betuminoso Rugoso a um aumento de 1,21% e a circulação sobre o Microaglomerado Betuminoso a Frio a um aumento de 0,34%.

CAPÍTULO 8

ANÁLISE DA SUSTENTABILIDADE DE DIFERENTES ESTRUTURAS DE PAVIMENTOS

8.1. Considerações iniciais

Para realizar uma análise de sustentabilidade de um pavimento rodoviário é necessário ter em consideração um conjunto de critérios e pressupostos para a realização de uma análise do ciclo de vida. Neste capítulo apresenta-se uma análise comparativa de três estruturas de pavimento diferentes, tendo por base um conjunto de cenários de conservação/reabilitação ao longo do seu ciclo de vida. Neste caso, para uma análise suficientemente alargada considerou-se um período de análise de 40 anos. Os resultados apresentados ao longo do capítulo foram obtidos através da aplicação da metodologia desenvolvida (e apresentada no Capítulo 4), tendo em conta os resultados laboratoriais de avaliação dos consumos obtidos no protótipo apresentado no Capítulo 5, que foram já discutidos no Capítulo 7.

8.2. Estruturas de pavimentos analisadas

De forma a avaliar a sustentabilidade de diferentes pavimentos procedeu-se à análise e comparação de três estruturas que diferiam essencialmente na camada de desgaste. Nesse sentido considerou-se, para a referida camada, a utilização de três misturas betuminosas: um betão betuminoso convencional (AC 14 surf 35/50), uma mistura betuminosa porosa (Betão Betuminoso Drenante) e uma mistura

betuminosa aberta (Betão Betuminoso Rugoso). A restante constituição destas estruturas é composta por duas camadas de macadame betuminoso (AC 20 bin 35/50 e AC 20 base 35/50) e duas camadas granulares (base e sub-base).

As propriedades mecânicas das misturas consideradas nas várias camadas betuminosas que constituem os pavimentos foram obtidas experimentalmente, conforme apresentado no Capítulo 6. Os módulos de rigidez foram assim obtidos através de ensaios de flexão a 4 pontos, para uma temperatura de 20 °C e uma frequência de 8 Hz, tendo sido considerados para a mistura AC 14 surf (BB), a mistura PA 12,5 (BBd) e a mistura AC 14 surf (BBr) os valores de 4500, 3000 e 5000 MPa, respetivamente. Os módulos das restantes misturas (comuns a todas as estruturas) são apresentados na Figura 92.

Diferentes camadas de desgaste em estudo	
AC20 bin (MB)	5900 MPa
AC20 base (MB)	5900 MPa
Base granular	400 MPa
Sub-base granular	200 MPa
Fundação	100 MPa

Figura 92 – Representação esquemática das estruturas dos pavimentos consideradas

Os três pavimentos foram dimensionados de forma a suportarem o tráfego apresentado no Quadro 29, tendo-se considerado um período de vida útil para o dimensionamento inicial de 20 anos, como é habitual no caso de pavimentos rodoviários flexíveis. Considerou-se ainda, simplificada, que o tráfego médio diário apresentado no Quadro 29 se manteria constante ao longo de todo o período de análise da estrada (40 anos).

Quadro 29 – Tráfego médio diário por sentido de circulação

Veículos	Classe	Nº de veículos por dia
Ligeiros	D	25.693
	E	563
Pesados de mercadorias	F1	583
	F2	363
	G1	161
	G2	95
	H1	134
	H2	237
	H3	98
Pesados de passageiros	I	55

A partir destes dados determinou-se o tráfego de projeto, que se traduziu na passagem de $9,88 \times 10^7$ eixos-padrão de 80 kN durante a vida útil do pavimento (20 anos).

Determinaram-se depois as espessuras das várias camadas dos pavimentos, recorrendo ao *software* JPav (Pais, 2014), para que as estruturas de pavimentos em estudo fossem capazes de suportar a passagem do número de eixos-padrão anteriormente referido, de acordo com os critérios de ruína da Shell. Assim, a extensão radial de tração na parte inferior da camada de base betuminosa (ϵ_t) e a extensão vertical de compressão no topo do solo de fundação (ϵ_{dp}) foram determinadas e, recorrendo às Equações 4 e 5 apresentadas no Capítulo 2, determinou-se o número de eixos-padrão admissível por cada um dos critérios, considerando-se como critério crítico (ϵ_t ou ϵ_{dp}) aquele que admite a passagem de um menor número de eixos-padrão.

A determinação das espessuras das camadas dos pavimentos foi efetuada recorrendo a um processo iterativo até que o dano (razão entre o tráfego de projeto e o tráfego admissível) provocado ao pavimento no final da sua vida útil estivesse compreendido entre 80% e 100%. As espessuras das diferentes camadas são apresentadas no Quadro 30.

Quadro 30 – Espessura (mm) das várias camadas das diferentes estruturas de pavimento considerando um período de vida de 20 anos

Camada	Estrutura 1 (AC 14 surf BB)	Estrutura 2 (PA 12,5 BBd)	Estrutura 3 (AC 14 surf BBr)
Desgaste	40	40	30
AC 20 bin (MB)	80	80	80
AC 20 base (MB)	80	90	90
Base granular	150	150	150
Sub-base granular	160	150	150

Para o presente estudo considerou-se a construção de uma estrada constituída por duas vias (uma em cada sentido, com 3,5 m de largura) e pelas bermas (com 1,0 m cada uma), perfazendo uma largura total de 9,0 m. Os cálculos foram feitos para um comprimento de referência de 1 km, tendo-se considerado para todas as alternativas as mesmas distâncias médias de transporte dos materiais (10 km).

8.3. Estratégias de conservação adotadas

A qualidade de um pavimento vai evoluindo com o tempo (ou com as cargas dos veículos que o solicitam) sofrendo uma redução progressiva que está diretamente relacionada com o aparecimento de degradações na superfície do mesmo. Nesse sentido assume-se que a qualidade é excelente no momento de abertura ao tráfego e muito pobre no final do período de dimensionamento considerado. A Figura 93 representa a evolução típica da qualidade de um pavimento, conforme é apresentado por diversos autores (Bernucci *et al.* (2008); DCS (2008); Mueller (2012)).

Com vista à manutenção da qualidade das estruturas de pavimento em análise, foram definidos quatro cenários que contemplavam diferentes estratégias de conservação ao longo dos 40 anos de análise do ciclo de vida considerados para estes pavimentos. Os três primeiros cenários contemplam a construção de estruturas de pavimentos dimensionadas para o tráfego previsto para 20 anos e diferentes intervenções com diferentes intervalos de tempo entre si, ao passo que o quarto cenário difere desde logo na construção inicial, prevendo a construção de um pavimento perpétuo (mais espesso e dimensionado para um período de 50 anos) e intervenções de conservação menos frequentes. De

referir que, independentemente da estratégia de conservação adotada (mais ou menos conservativa), todos os cenários preveem a reposição da qualidade inicial do pavimento ao fim do período de análise (40 anos), garantindo-se assim que os diferentes cenários concorrem em condições de igualdade, permitindo a sua correta comparação.

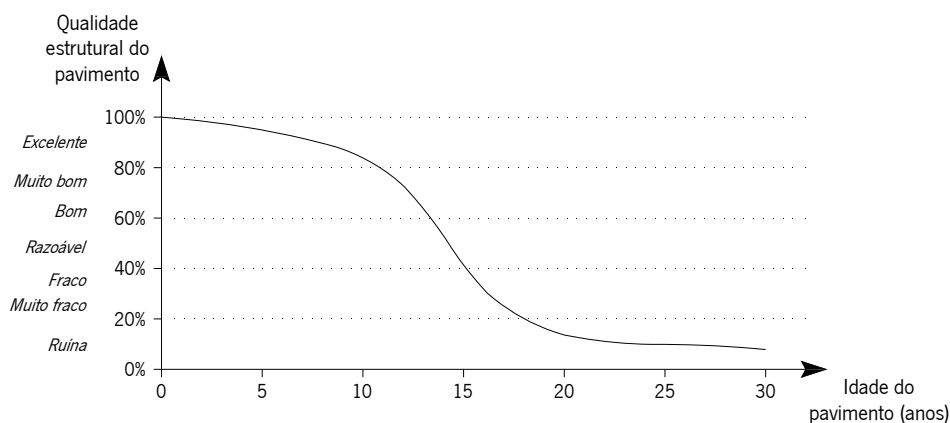


Figura 93 – Evolução típica da qualidade estrutural de um pavimento (adaptado de Bernucci *et al.* (2008), DCS (2008) e Mueller (2012))

- Cenário 1: intervenções de 20 em 20 anos

O cenário 1 apenas prevê a realização de intervenções de conservação/reabilitação ao fim de 20 anos (período para o qual o pavimento foi dimensionado), altura em que se deverá proceder à substituição total das camadas betuminosas, repetindo-se essa mesma ação ao fim de mais 20 anos. Para considerar uma abordagem mais sustentável na reabilitação do pavimento, as novas camadas betuminosas a colocar incorporarão parte do material resultante da fresagem das camadas antigas, sendo a percentagem de material reciclado a utilizar de 50% nas camadas de macadame betuminoso e de 10% na camada de desgaste.

Esta estratégia não prevê, portanto, qualquer intervenção sobre o pavimento durante o período para o qual foi dimensionado pelo que se prevê que este atinja um estado de degradação muito elevado, facto que se deverá traduzir, conseqüentemente, num aumento do consumo de combustível dos veículos que circulam sobre esse pavimento.

Prevê-se assim que, de acordo com este cenário, a qualidade estrutural dos pavimentos siga a evolução apresentada na Figura 94.

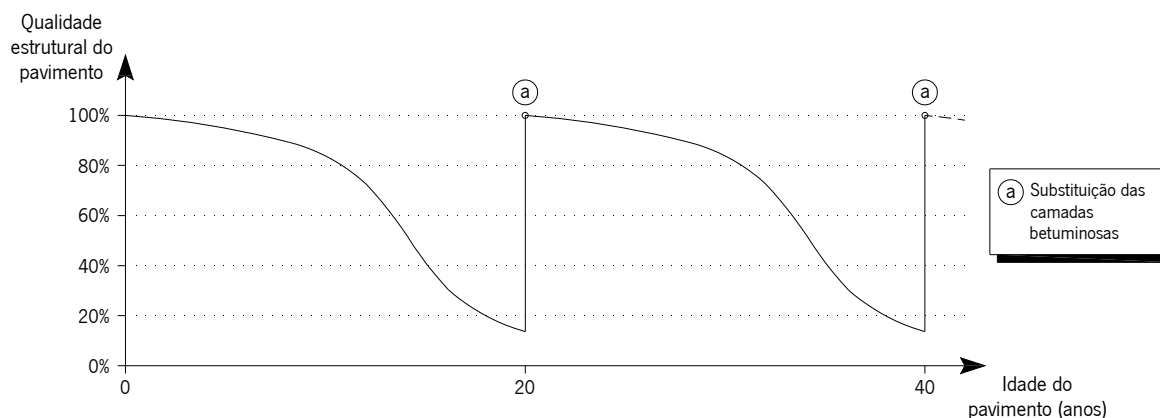


Figura 94 – Evolução prevista para a qualidade estrutural do pavimento considerando o cenário 1

- *Cenário 2: intervenções de 8 em 8 anos*

O cenário 2 já prevê intervenções mais frequentes (de 8 em 8 anos) de acordo com a seguinte programação:

- Anos 8 e 16: fresagem e recolocação da camada de desgaste com 10% de material reciclado;
- Ano 24: fresagem e recolocação das camadas de ligação e de desgaste, incorporando, respetivamente, 50% e 10% de material reciclado;
- Ano 32: fresagem e recolocação da camada de desgaste com 10% de material reciclado;
- Ano 40: fresagem e recolocação de todas as camadas betuminosas, incorporando as camadas de macadame betuminoso 50% de material reciclado e a camada de desgaste 10%.

Esta, comparativamente com a anterior, já é uma estratégia mais conservadora, que aposta na manutenção da qualidade estrutural do pavimento em níveis mais elevados, a qual se considerou seguir a evolução apresentada na Figura 95.

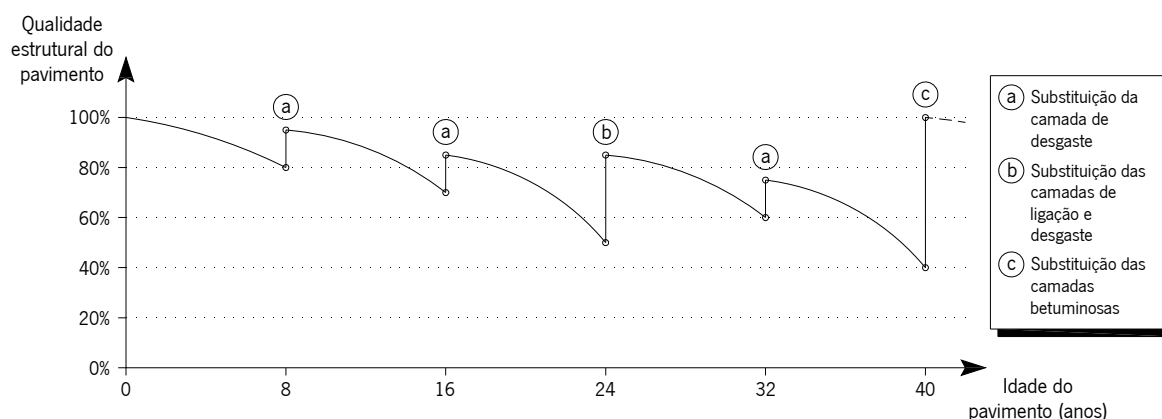


Figura 95 – Evolução prevista para a qualidade estrutural do pavimento considerando o cenário 2

- Cenário 3: intervenções de 4 em 4 anos

O cenário 3 aposta numa estratégia de manutenção mais conservativa, com intervenções a cada 4 anos, de acordo com a seguinte programação:

- Anos 4 e 8: melhoria das características superficiais (sobreposição de Microaglomerado Betuminoso a frio na mistura AC 14 surf (BB), Granalhagem e selagem de fendas da mistura AC 14 surf (BBr), e limpeza e aspiração dos poros da mistura drenante PA 12,5 (BBd) e eventual selagem de fendas;
- Ano 12: fresagem e recolocação da camada de desgaste com 10% de material reciclado;
- Anos 16 e 20: melhoria das características superficiais (conforme indicado para os anos 4 e 8);
- Ano 24: fresagem e recolocação das camadas de ligação e de desgaste, incorporando, respetivamente, 50% e 10% de material reciclado;
- Ano 28: melhoria das características superficiais (conforme indicado para os anos 4 e 8);
- Ano 32: fresagem e recolocação da camada de desgaste com 10% de material reciclado;
- Ano 36: melhoria das características superficiais (conforme indicado para os anos 4 e 8);
- Ano 40: fresagem e recolocação de todas as camadas betuminosas, incorporando as camadas de macadame betuminoso e de desgaste 50% e 10% de material reciclado, respetivamente.

Dos cenários considerados, este é o mais conservador, apostando numa estratégia preventiva. Com a realização de intervenções mais frequentes pretende-se evitar que o pavimento atinja níveis de degradação mais elevados, o que permitirá realizar intervenções mais simples e, por isso, menos dispendiosas.

Considerou-se assim que, para este cenário, a qualidade estrutural dos pavimentos seguiria a evolução apresentada na Figura 96.

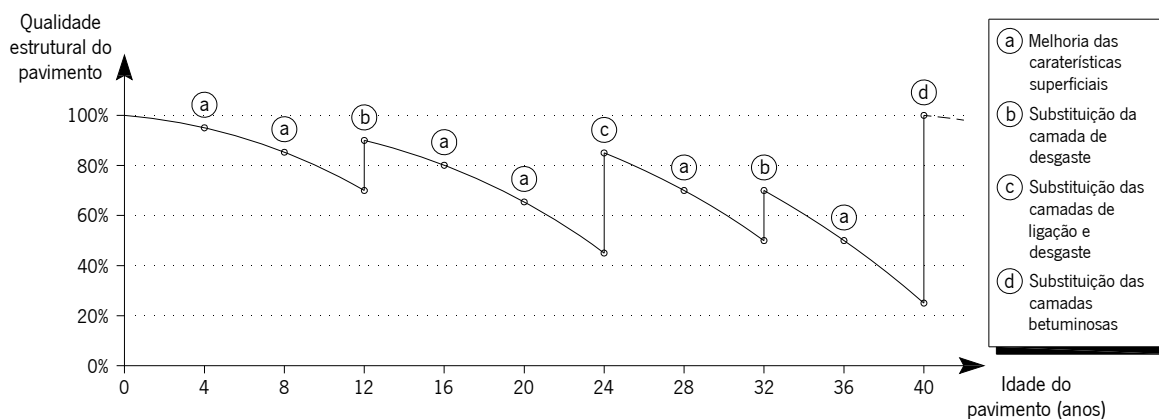


Figura 96 – Evolução prevista para a qualidade estrutural do pavimento considerando o cenário 3

No cenário 3, não é visível uma melhoria significativa da qualidade estrutural do pavimento aquando da aplicação das intervenções do tipo a. No entanto, a perda de qualidade é mais lenta, como se pode concluir se for comparado o nível de qualidade obtido nas Figuras 95 e 96 ao fim de 8 anos (no primeiro caso, o valor reduz-se para os 80% enquanto no segundo caso não chega a atingir esse valor).

- Cenário 4: pavimento perpétuo com intervenções de 10 em 10 anos

O cenário 4, ao contrário dos outros três que consideravam as estruturas de pavimento dimensionadas na secção 8.2, prevê a construção de um pavimento perpétuo, o qual, devido à sua maior espessura, deverá degradar-se bastante menos do que a estrutura mais fina, o que implicará a utilização de operações de conservação mais simples e menos dispendiosas/poluentes.

Enquanto os pavimentos flexíveis convencionais são normalmente dimensionados para um período de vida de 20 anos, para os pavimentos perpétuos esse período é geralmente alargado para os 50 anos (Basu *et al.*, 2013). A partir do tráfego apresentado no Quadro 29 determinou-se o tráfego de projeto para esse período de 50 anos, o qual se traduziu na passagem de $2,47 \times 10^8$ eixos-padrão de 80 kN.

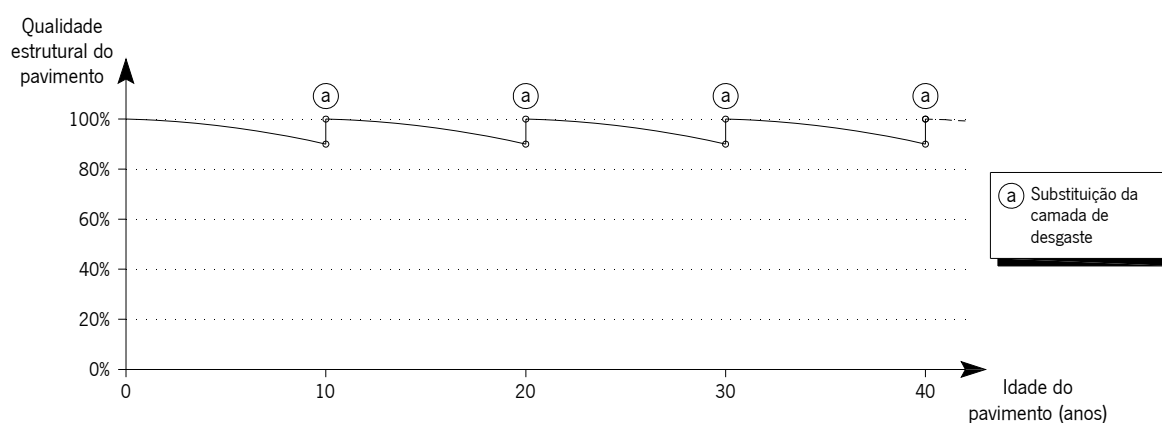
Repetindo o procedimento de dimensionamento apresentado na secção 8.2, determinaram-se as espessuras das diferentes camadas para as 3 estruturas em estudo, tendo sido obtidos os valores apresentados no Quadro 31.

Quadro 31 – Espessura (mm) das várias camadas das diferentes estruturas de pavimento considerando um período de vida de 50 anos

Camada	Estrutura 1 (AC 14 surf BB)	Estrutura 2 (PA 12,5 BBd)	Estrutura 3 (AC 14 surf BBr)
Desgaste	40	40	30
AC 20 bin (MB)	100	100	100
AC 20 base (MB)	110	120	120
Base granular	150	150	150
Sub-base granular	150	150	150

Conforme referido anteriormente, sendo este um pavimento mais espesso, não será de prever que sofra uma degradação significativa. Por essa razão, em termos de operações de conservação, considerou-se apenas a substituição da camada de desgaste de 10 em 10 anos, por outra de mistura betuminosa idêntica, incorporando 10% de material reciclado.

Para este cenário, a evolução da qualidade dos pavimentos considerada foi a que se encontra apresentada na Figura 97.

**Figura 97** – Evolução prevista para a qualidade estrutural do pavimento considerando o cenário 4

Conforme se pode observar na Figura 97, neste cenário a qualidade estrutural do pavimento nunca chega a reduzir-se de forma significativa, mantendo-se acima dos 90% durante todo o período de análise considerado.

8.4. Modelos de degradação dos pavimentos

A degradação de um pavimento consiste na redução progressiva da sua qualidade inicial, ao longo da sua vida útil. As degradações influenciam-se mutuamente, isto é, como consequência de uma surgirão outras, a quais por sua vez influenciarão a evolução das primeiras, gerando-se assim uma cadeia de acontecimentos fortemente dependentes.

A adoção de estratégias de conservação mais ou menos preventivas ou, pelo contrário, a realização de intervenções com carácter apenas corretivo, quando o pavimento já tenha atingido estados de degradação consideráveis, permitirá assim manter o pavimento em boas condições durante mais tempo ou acelerar o seu processo de degradação. Esta questão assume grande importância nas análises do ciclo de vida em estudo, na medida em que o estado de degradação dos pavimentos influenciará o consumo de combustível dos veículos que circulem nessa estrada durante o período em análise.

A irregularidade (considerada através do parâmetro IRI) é muitas vezes usada para medir a qualidade global dos pavimentos, a partir da qual podem ser estimados consumos adicionais de combustível (Chang *et al.* (2009); Zaabar e Chatti (2010); Noshadravan *et al.* (2013)). Assim, para a realização do presente estudo, a evolução da degradação foi considerada através de modelos de previsão do parâmetro IRI. Rodrigues (2013) analisou vários desses modelos, tendo-os aplicado a alguns casos de estudo. Dessa análise poderá concluir-se que o modelo HDM-4 será aquele que, de entre os mais atuais, melhor se adequará à realidade portuguesa, razão pela qual se adotou este modelo para a previsão da evolução da degradação das estruturas de pavimento em estudo.

O modelo HDM-4 é um modelo empírico-mecanicista, que foi desenvolvido na sequência do HDM-III, num estudo internacional, realizado entre 1993 e 1995, designado de ISOHDM (*International Study of Highway Development and Management Tools*). Este modelo, além de atualizar as relações anteriormente estabelecidas, na previsão da irregularidade longitudinal (IRI) para pavimentos flexíveis adicionou três novas componentes: desagregação superficial, peladas e remendos (N.D. Lea International Ltd., 1995).

Os resultados obtidos por Rodrigues (2013) para a mesma classe de tráfego (T1) e de fundação (F3) do MACOPAV (JAE, 1995), e uma estrutura de pavimento semelhante às consideradas no presente estudo são apresentados na Figura 98. Estes resultados consideram um IRI inicial (IRI₀) de 0,5, no entanto, esse autor concluiu que em qualquer combinação, partindo de diferentes valores de IRI₀, o crescimento do IRI é pouco alterado.

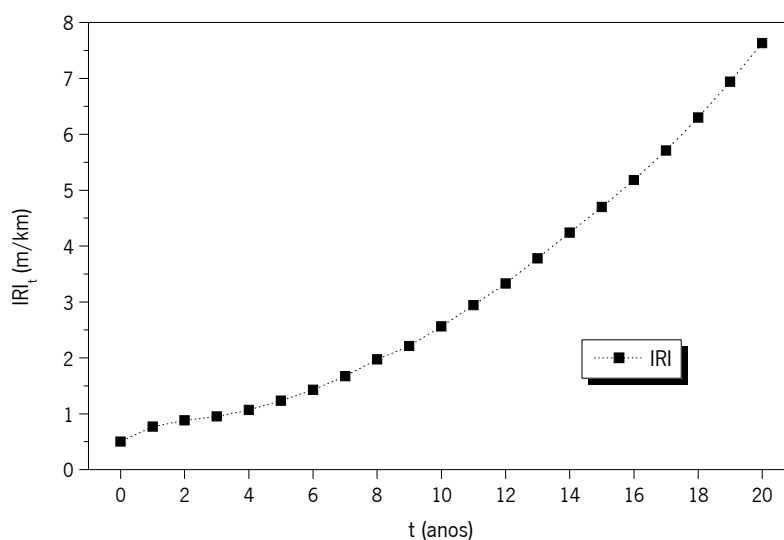


Figura 98 – Previsão da irregularidade no final do ano t, IRI_t (m/km), para um pavimento com fundação F3 e classe de tráfego T1 (adaptado de Rodrigues (2013))

Esta evolução da degradação foi então aplicada às estruturas de pavimento em estudo, tendo-se considerado para tal que, a substituição da camada de desgaste repunha o IRI no valor inicial enquanto as atividades de melhoria das características superficiais realizadas no cenário 3, não impunham a redução desse valor mas alteravam a sua evolução posterior, isto é, após a realização de tais atividades, o IRI voltava a evoluir de acordo com a tendência verificada na parte inicial do gráfico apresentado na Figura 98.

Para o cenário 4, por prever a utilização de pavimentos perpétuos, os quais devido à sua maior robustez não deverão ser tão suscetíveis ao aparecimento e evolução das degradações, considerou-se que o aumento do IRI registado a cada ano seria de apenas metade do valor considerado nas restantes estruturas.

Da aplicação dos resultados anteriores às características dos cenários em estudo, conclui-se que evolução do IRI será, para cada cenário, a apresentada na Figura 99.

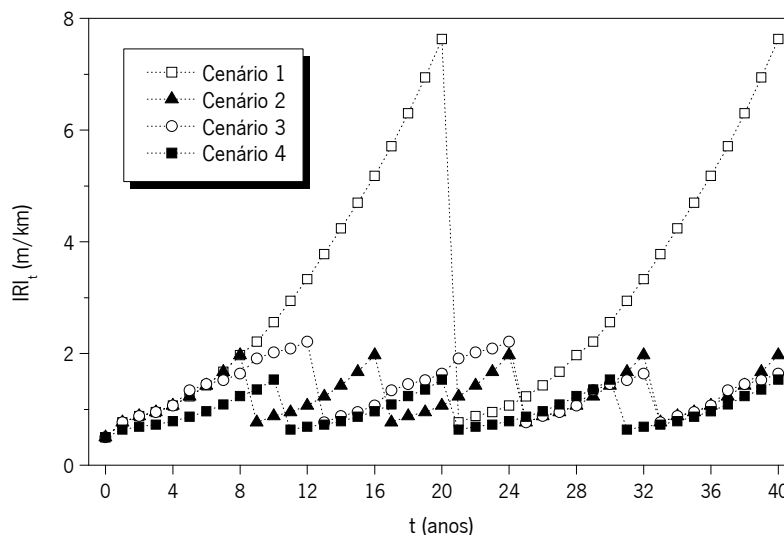


Figura 99 – Evolução do IRI (m/km) esperada para cada cenário em estudo

As variações do IRI assim definidas permitiram depois estimar variações do consumo de combustível dos veículos ligeiros e pesados (de mercadorias e de passageiros) ao longo do período de análise considerado, a partir das médias dos valores apresentados no Quadro 3, por tipo de veículo, definindo-se deste modo uma variação percentual de consumo de combustível a aplicar pela variação de uma unidade de IRI.

8.5. Impactes imputáveis a cada estrutura de pavimento

A comparação das soluções em estudo visou, sobretudo, avaliar os impactes imputáveis à sua construção, conservação e utilização, os quais foram determinados com recurso à metodologia apresentada no Capítulo 4. Assim, procede-se de seguida à apresentação e análise das emissões de CO₂, CH₄, N₂O, SO₂ e de NO_x imputáveis a cada pavimento e respetivos cenários, bem como do consumo de energia (combustível) imputável à circulação dos veículos previstos durante o período em análise sobre cada uma das superfícies. Em função das emissões de CO₂, CH₄ e N₂O apresentadas, por se tratar de gases com efeito de estufa, procede-se ainda à comparação do potencial de aquecimento global (GWP) de cada solução.

8.5.1. Impactes da construção inicial

Conforme apresentado anteriormente, as três estruturas em estudo apresentam uma constituição

bastante semelhante, diferindo apenas na composição da camada de desgaste e nas espessuras das camadas betuminosas. Apesar de não se considerarem muito significativas, essas diferenças traduzem-se no consumo de recursos necessários à construção de cada uma delas, apresentando-se os resultados da sua quantificação na Figura 100.

Tanto neste caso como nas análises apresentadas ao longo do restante capítulo, privilegiou-se a apresentação gráfica dos resultados obtidos por permitir estabelecer comparações de forma mais simples e imediata, no entanto, para uma análise mais rigorosa, esses resultados poderão também ser consultados sob a forma de quadros apresentados no Anexo B deste documento.

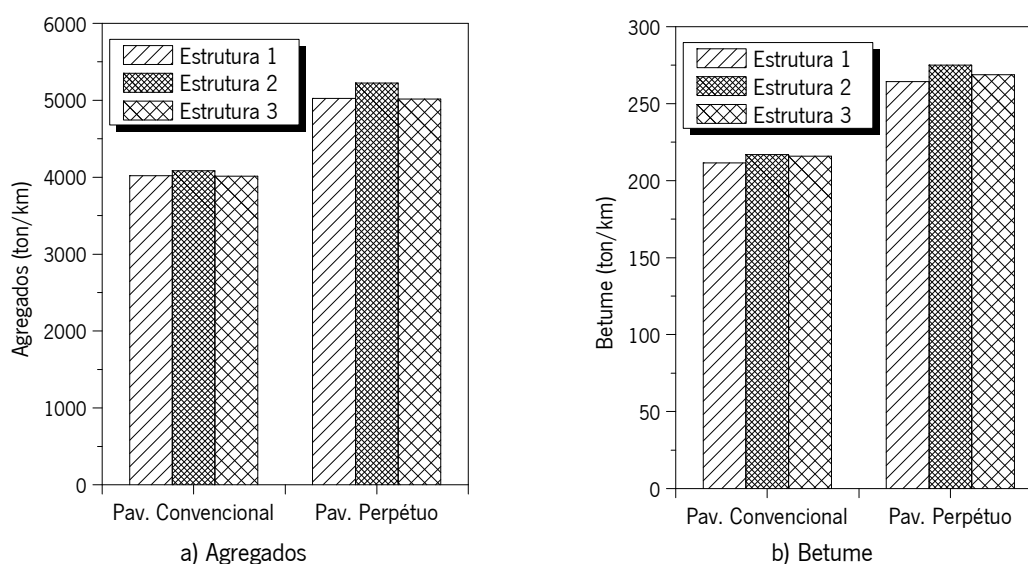


Figura 100 – Recursos utilizados na construção dos pavimentos

Conclui-se assim que as estruturas 1 e 3 obrigam a consumos semelhantes de recursos materiais para a sua construção, enquanto a estrutura 2 (com mistura drenante na camada de desgaste) já exige maiores quantidades de agregados e de betume.

Os resultados relativos ao consumo de energia e às emissões obtidas para a construção de 1 km de pavimento são apresentados na Figura 101.

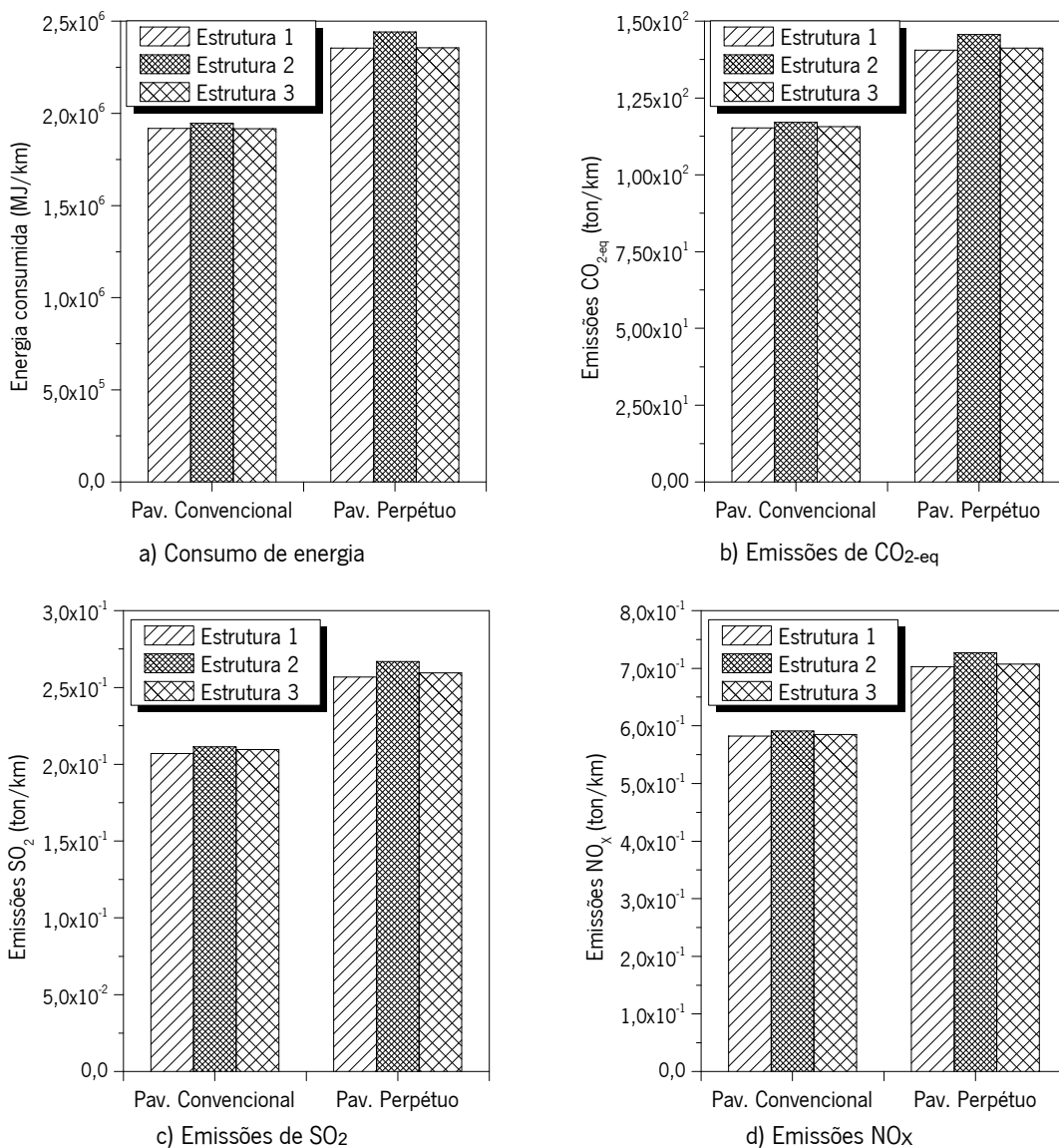


Figura 101 – Consumo de energia e emissões resultantes da construção inicial

A representação gráfica, à semelhança da tendência verificada para os consumos de materiais, evidencia um ligeiro aumento do consumo de energia e das emissões libertadas durante a construção da estrutura 2 comparativamente com as outras estruturas. Os gráficos das Figuras 100 e 101 mostram também o acréscimo dos consumos e emissões da construção do pavimento perpétuo (considerado no cenário 4), aumento esse que ronda, em média, os 22%.

8.5.2. Impactes das operações de conservação

Tendo por base as estratégias de conservação subjacentes a cada um dos cenários anteriormente descritos, nas Figuras 102 e 103 apresenta-se um resumo dos recursos novos (agregados e betume)

necessários à implementação dessas estratégias ao longo dos 40 anos do período de análise, bem como da quantidade de material fresado (RAP) reutilizado nessas mesmas operações (Figura 104).

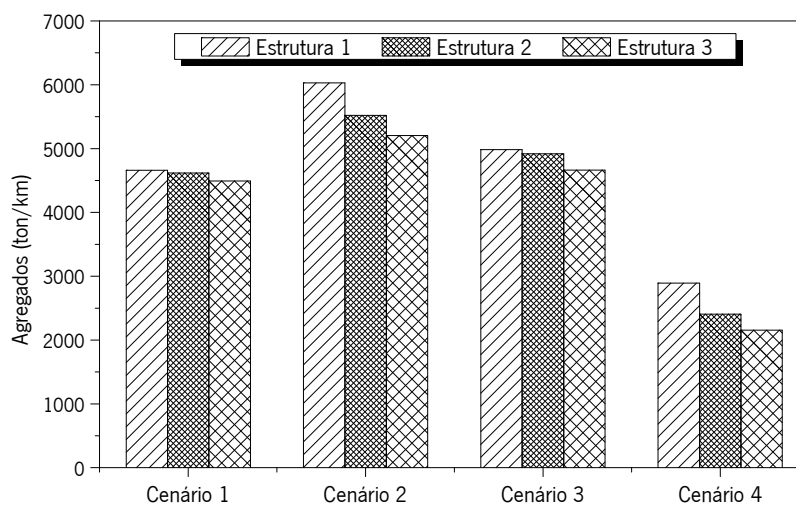


Figura 102 – Agregados virgens necessários para as operações de conservação

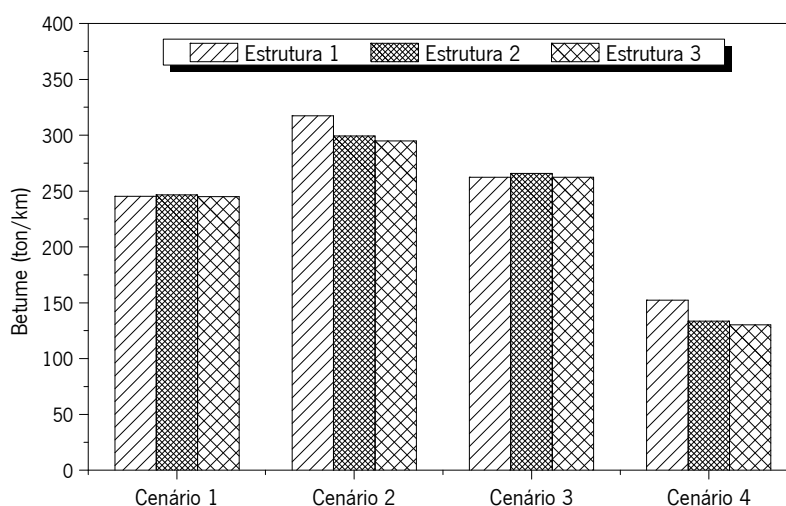


Figura 103 – Betume novo necessário para as operações de conservação

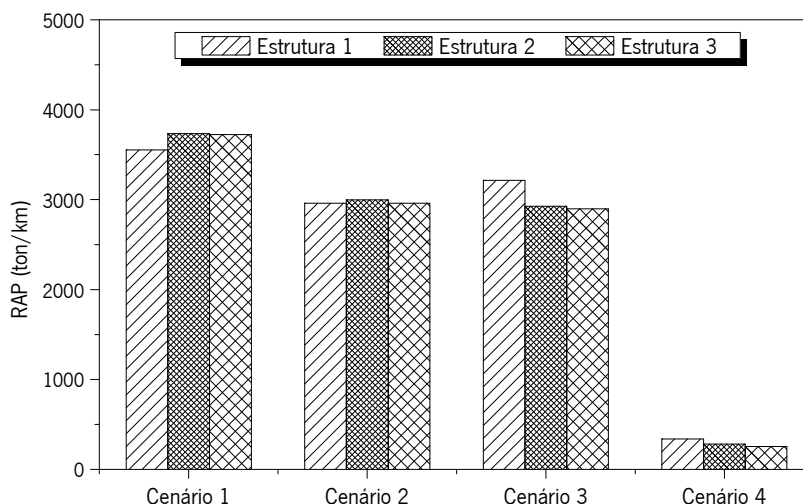


Figura 104 – Material fresado (RAP) reutilizado nas operações de conservação

Os dados obtidos demonstram que o cenário 2 é o que obriga a um maior consumo de materiais virgens (agregados e betume). Segue-se o cenário 3, o qual, comparativamente com o cenário anterior já permite reduções significativas do consumo de materiais, as quais ainda aumentam para o cenário 1. Por fim, o cenário 4, que prevê a utilização de pavimentos perpétuos, será aquele que obrigará a um menor consumo de matérias-primas. Devido à maior robustez destes pavimentos, apenas se previu a substituição da camada de desgaste de 10 em 10 anos, apontando as previsões para reduções do consumo de agregados e de betume superiores a 50% face aos valores registados para o cenário de maior consumo (cenário 2).

A reutilização de material fresado (RAP) apresenta valores muito baixos no caso do cenário 4, representando apenas cerca de 8% da reutilização prevista para o cenário 1 e quase 10% da utilização prevista para os cenários 2 e 3. Essas diferenças já eram expectáveis uma vez que o cenário 4 (pavimento perpétuo) previa ações de conservação mais simples e menos frequentes. Enquanto os outros cenários previam, em determinados momentos a substituição de camadas de base e de ligação, incorporando 50% de material reciclado, além da substituição da camada de desgaste com incorporação de 10% de RAP, o cenário 4 apenas previa esta atividade (substituição da camada de desgaste com incorporação de 10% de RAP) mas com uma menor frequência, fruto da menor degradação que este pavimento deverá sofrer.

Os resultados relativos ao consumo de energia e às emissões gasosas resultantes das operações de conservação consideradas nos diferentes cenários, por cada quilómetro de pavimento, são

apresentados nas Figuras 105 a 108, onde se pode constatar, uma vez mais, que o cenário 2 é o que apresenta maiores impactes, tanto em termos de consumo de energia, como de emissões libertadas, seguido dos cenários 3 e 1. Devido à previsão da necessidade de operações de manutenção mais simples e menos frequentes, o cenário 4 é aquele que apresenta menores impactes.

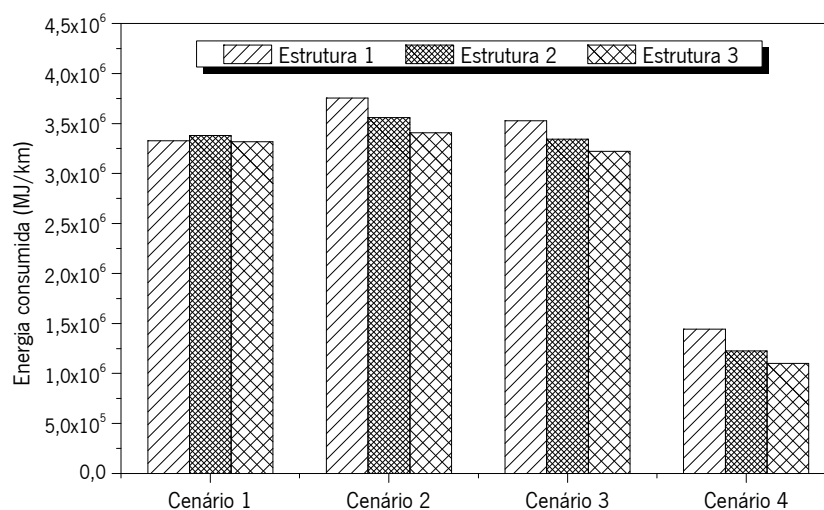


Figura 105 – Consumo de energia resultante das operações de conservação

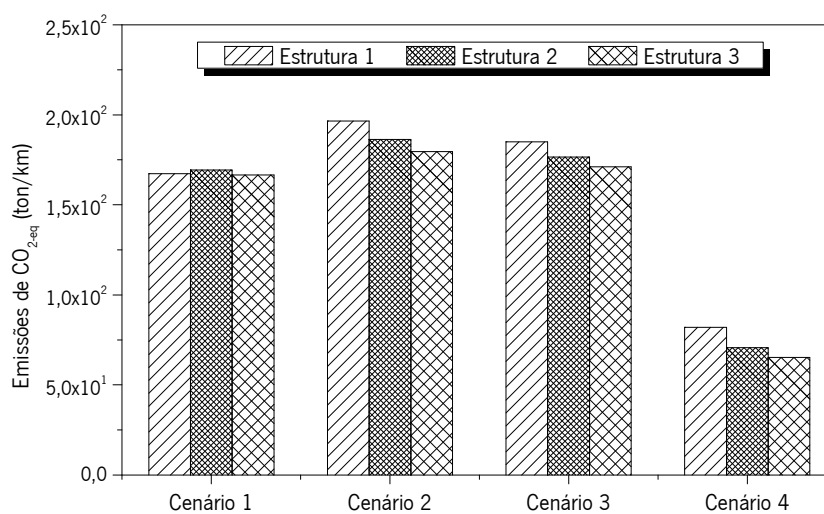


Figura 106 – Emissões de CO₂-eq resultantes das operações de conservação

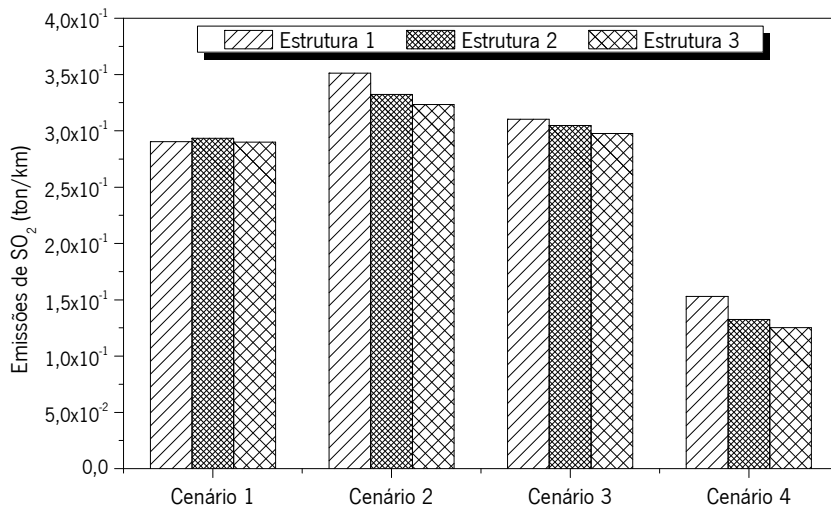


Figura 107 – Emissões de SO₂ resultantes das operações de conservação

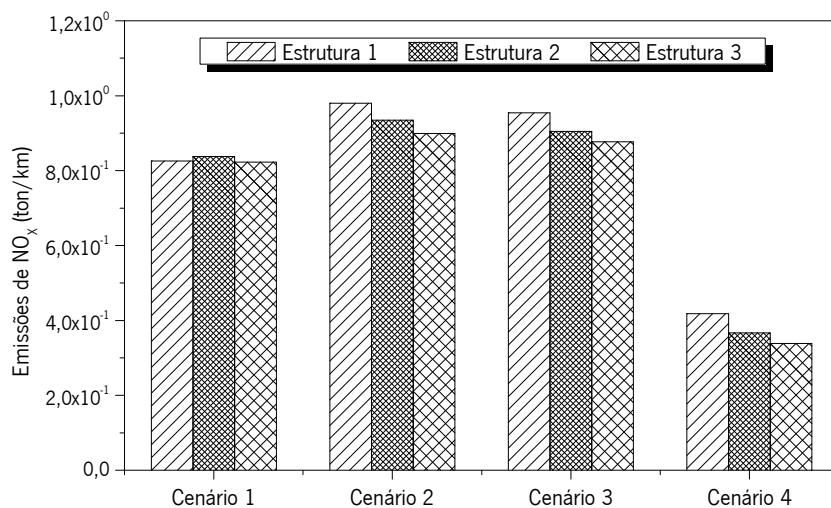


Figura 108 – Emissões de NO_x resultantes das operações de conservação

Relativamente à comparação entre estruturas de pavimento, dos impactes resultantes das operações de conservação, constata-se que, para a generalidade dos cenários, a estrutura 1 é a mais gravosa, seguida da estrutura 2, à qual, por sua vez, se segue a estrutura 3, que surge como sendo a mais vantajosa. A única exceção é relativa ao cenário 1, para o qual as estruturas 1 e 3 apresentam impactes semelhantes e às quais se sobrepõe a estrutura 2.

De referir que não se apresentou a quantificação do material fresado e não reutilizado na produção de novas misturas a aplicar na mesma estrada, dado ter-se considerado que esse material sobranete seria reaproveitado para a produção de misturas recicladas para outras obras. Optou-se assim por não se considerar qualquer encargo/emissão adicional a partir do momento em que este material era depositado na central de produção para ser reaproveitado.

8.5.3. Análise comparativa dos impactes das operações de construção e conservação

Os resultados apresentados nas secções 8.5.1 e 8.5.2 evidenciam uma desvantagem do cenário 4 ao nível da construção inicial, uma vez que prevê a construção de estruturas de pavimento mais espessas (pavimentos perpétuos), mas mostram também uma clara vantagem deste cenário no que se refere às operações de conservação. Importa, portanto, analisar estes dados em conjunto para se perceber qual a solução mais favorável para o período em análise.

Assim, nas Figuras 109 e 110 apresentam-se os resultados relativos à totalidade dos novos recursos materiais necessários para as operações de construção e conservação.

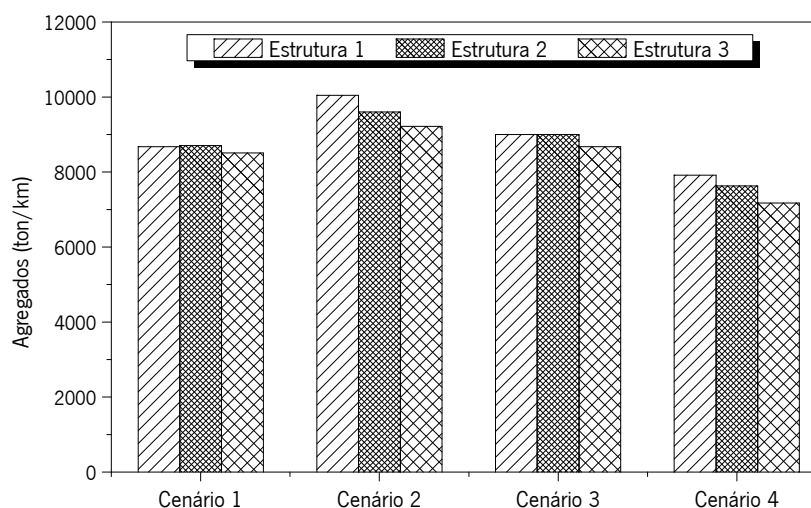


Figura 109 – Agregados virgens necessários para as operações de construção e conservação

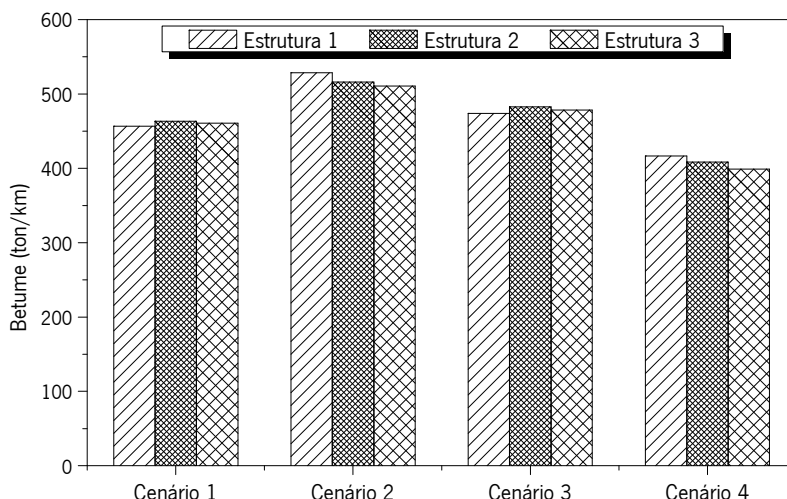


Figura 110 – Betume novo necessário para as operações de construção e conservação

Relativamente ao consumo de recursos materiais para a execução da totalidade das operações de construção e de conservação dos pavimentos em estudo, conclui-se que, de uma forma geral, a estrutura 1 é a que obriga à utilização de maiores quantidades de materiais, enquanto a estrutura 3 é a que implica menores quantidades. Comparando os diferentes cenários, constata-se que o cenário 4 é o mais vantajoso, em contraposição com o cenário 2 que, independentemente da estrutura, é o que obriga à utilização de maiores quantidades de materiais.

De igual forma, nas Figuras 111 a 114, apresenta-se o consumo de energia e as emissões gasosas, por cada quilómetro de pavimento, resultantes dessas mesmas operações.

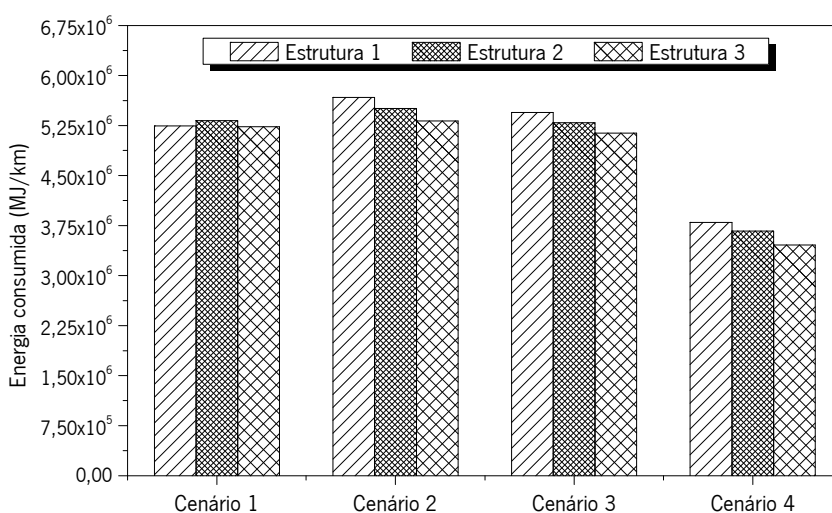


Figura 111 – Consumo de energia resultante das operações de construção e conservação

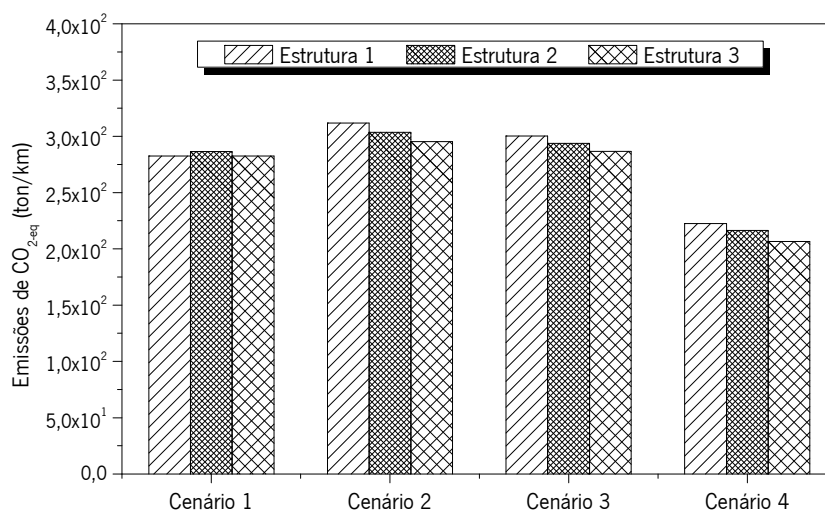


Figura 112 – Emissões de CO_{2-eq} resultantes das operações de construção e conservação

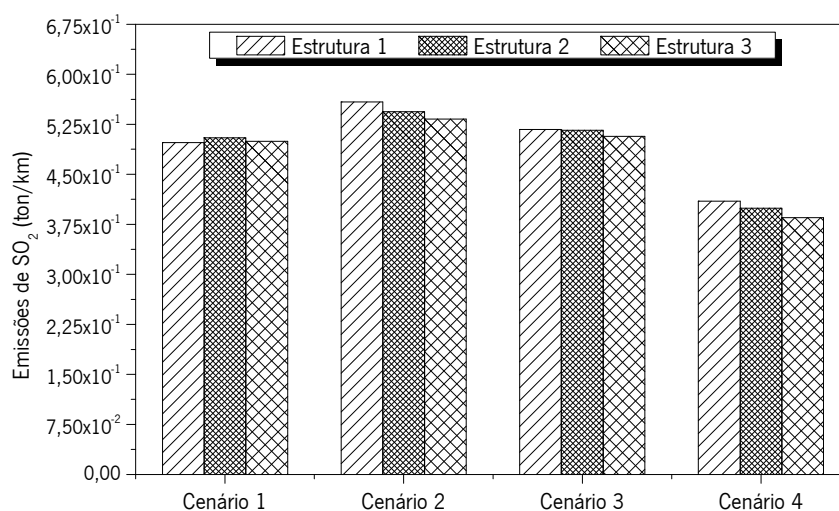


Figura 113 – Emissões de SO₂ resultantes das operações de construção e conservação

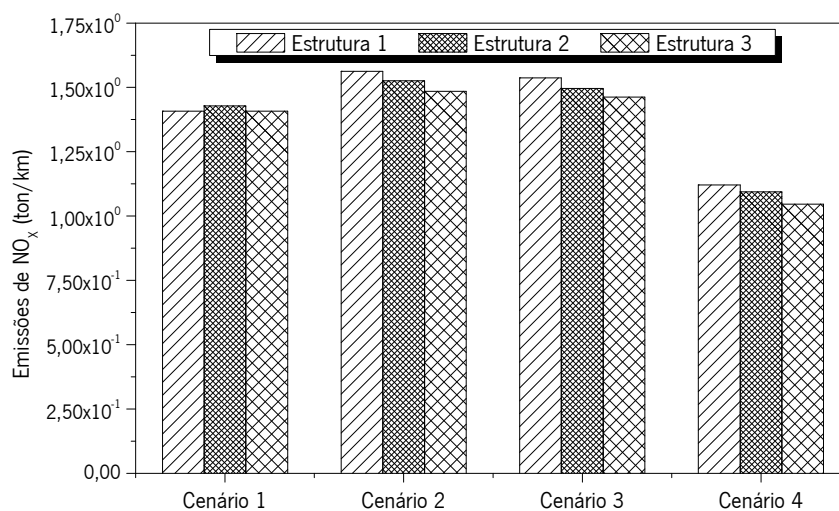


Figura 114 – Emissões de NO_x resultantes das operações de construção e conservação

O conjunto dos impactos resultantes das operações de construção do pavimento e de conservação ao longo do período em análise mostram que o cenário 4 apresenta claras vantagens comparativamente com os restantes. Embora para a sua construção inicial obrigue a um maior dispêndio de energia e de matérias-primas, e provoque a libertação de maiores quantidades de emissões gasosas, a redução conseguida durante o período de utilização, com as operações de conservação, compensam essas desvantagens, passando essa solução a ser, sem dúvida, a mais vantajosa.

Essa vantagem já é perceptível ao nível do consumo de agregados e de betume (Figuras 109 e 110, respetivamente), mas torna-se mais evidente ao nível do consumo de energia e das emissões libertadas (Figuras 111 a 114), ficando essa diferença a dever-se à reutilização do material fresado. Com efeito, os cenários 1, 2 e 3 implicam a utilização de maiores quantidades de misturas betuminosas ao longo dos 40 anos em análise, facto que coloca o cenário 4 em clara vantagem. No entanto, como este só prevê a utilização de 10% de material reciclado (uma vez que ao longo desse período apenas será substituída a camada de desgaste), as diferenças entre os cenários são atenuadas ao comparar o consumo de materiais, uma vez que os outros 3 cenários preveem em diversas ações a utilização de 50% de material fresado nas camadas betuminosas inferiores.

8.5.4. Impactes da utilização da estrada pelos utentes

Os impactos resultantes da utilização da estrada foram igualmente determinados através da metodologia desenvolvida. Para tal, tendo em conta o tráfego diário dos diferentes tipos de veículos apresentado no Quadro 29, foram tomados como referência os valores de 9,15 l/100km, 39,42 l/100km e 45,37 l/100km para os consumos médios dos veículos ligeiros, dos pesados de mercadorias e dos pesados de passageiros, respetivamente (Gomes *et al.*, 2011), os quais foram atribuídos à estrutura 1 (estrutura com mistura AC 14 surf 35/50 (BB) na camada de desgaste) no ano de abertura ao tráfego, estimando-se assim os custos com combustível para o tráfego previsto, nesse ano e nessa superfície de pavimento.

De acordo com as extrapolações apresentadas na secção 7.4, estes consumos de referência foram agravados em 2,63% para os pavimentos da estrutura 2 (com Betão Betuminoso Drenante na camada de desgaste), 1,21% nos pavimentos da estrutura 3 (com Betão Betuminoso Rugoso), e 0,34% nos pavimentos da estrutura 1 após a aplicação do Microaglomerado Betuminoso a Frio.

Além disso, tendo a conta a média dos valores compilados por Mclean e Foley (1998), e apresentados no Quadro 3, fizeram-se variar esses consumos médios de combustível ao longo do tempo, em função da qualidade do pavimento. Para tal, a partir da evolução do IRI esperada para cada cenário, e apresentada na Figura 99, impôs-se uma variação, por unidade de IRI, de 1,4% ao consumo de combustível dos veículos ligeiros e de 2,6% ao consumo de combustível dos veículos pesados.

O consumo de combustível do tráfego previsto para essa estrada, relativo ao período em análise (40 anos), foi depois convertido pela metodologia em consumo de energia e foram estimadas as emissões gasosas resultantes da sua combustão pelos veículos, sendo os resultados apresentados nas Figuras 115 a 118. Como já seria de esperar, estes resultados indicam que a estrutura 2 é a que implica maiores impactes, devido ao maior consumo de combustível, seguida da estrutura 3 e da estrutura 1 que surge como a mais vantajosa. Relativamente à comparação entre cenários, também sem surpresa, conclui-se que o cenário 1, que não previa qualquer ação de conservação durante 20 anos e, portanto, levaria a que o pavimento atingisse níveis de qualidade muito baixos, é o que apresenta maiores impactes, como consequência de um maior consumo de combustível, não existindo diferenças significativas entre os restantes cenários.

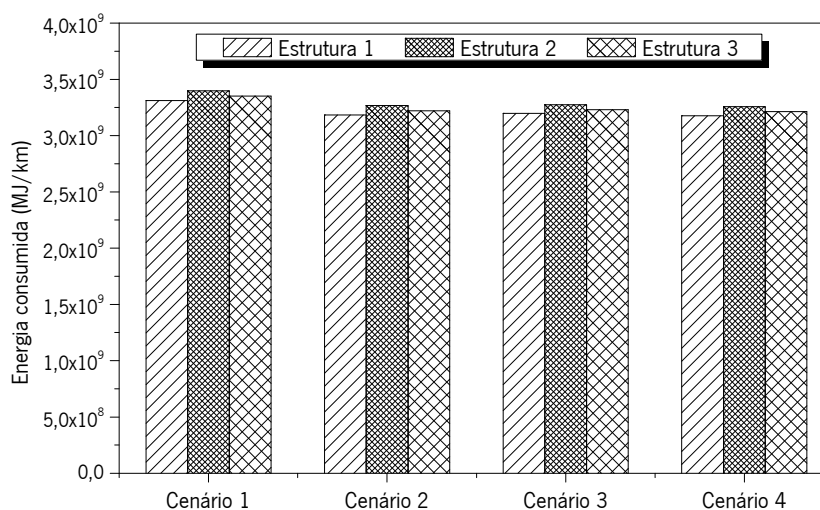


Figura 115 – Consumo de energia resultante da utilização da estrada

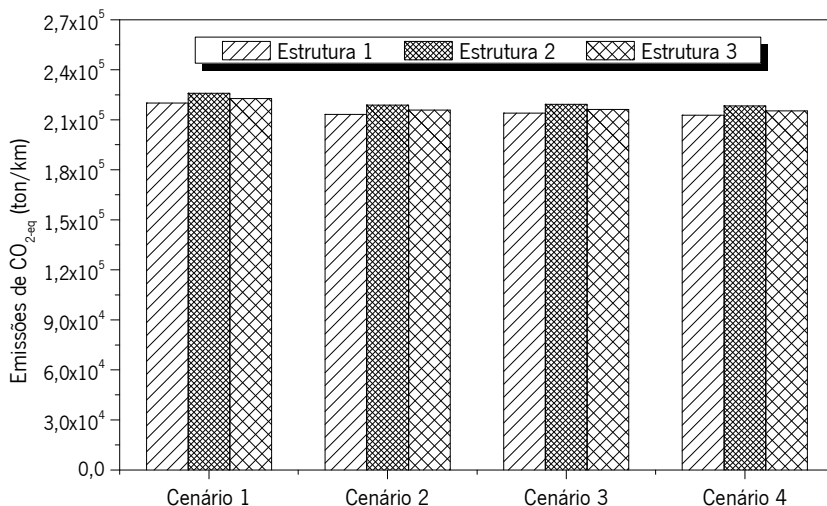


Figura 116 – Emissões de CO₂-eq resultantes da utilização da estrada

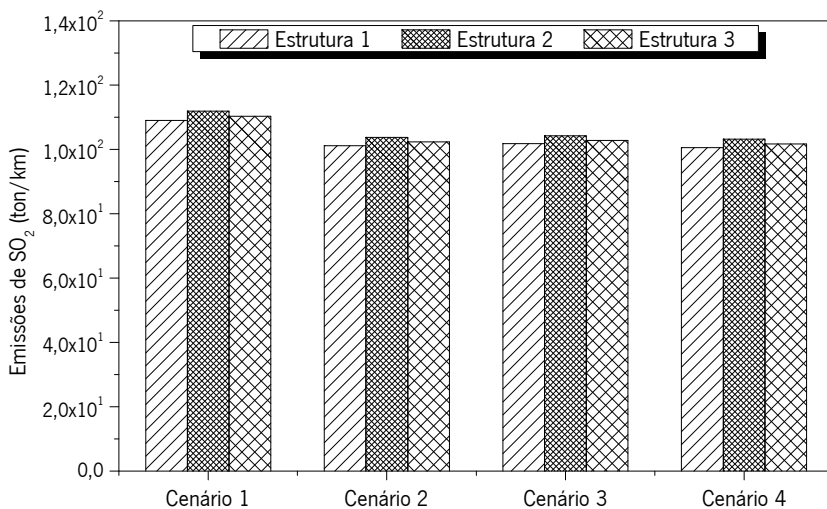


Figura 117 – Emissões de SO₂ resultantes da utilização da estrada

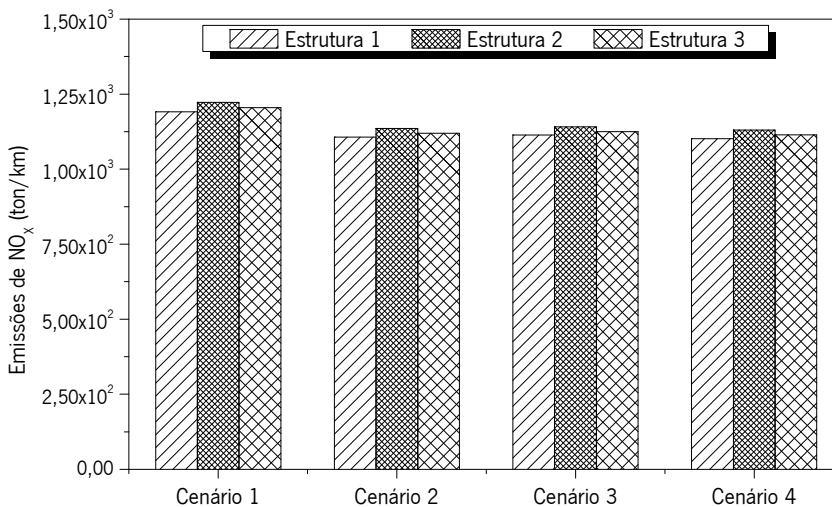


Figura 118 – Emissões de NO_x resultantes da utilização da estrada

8.5.5. Análise global dos impactes no período de análise da estrada

Os dados apresentados nas secções anteriores foram depois compilados, de forma a efetuar-se uma análise global de todos os impactes ao longo do período em análise. Pretende-se assim comparar as diferentes soluções de pavimento e determinar quais as que resultarão em maiores ou menores consumos de energia e emissões gasosas, fruto, quer das operações de construção e conservação, quer da utilização da estrada pelos veículos que compõe o tráfego de projeto, apresentando-se os resultados obtidos nas Figuras 119 a 122.

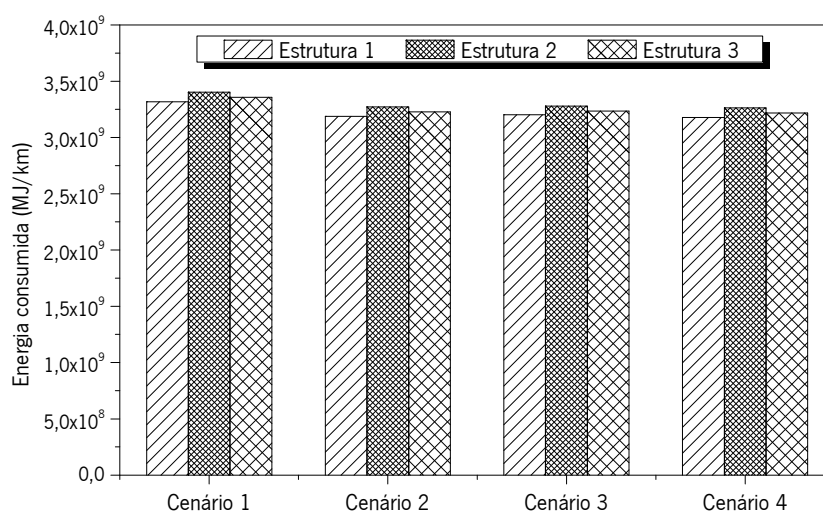


Figura 119 – Consumo global de energia no período de análise do ciclo de vida da estrada

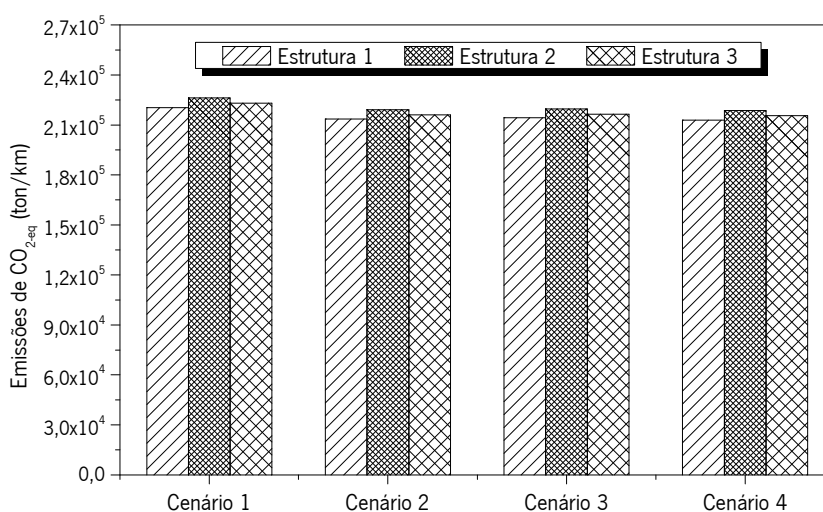


Figura 120 – Emissões globais de CO₂-eq no período de análise do ciclo de vida da estrada

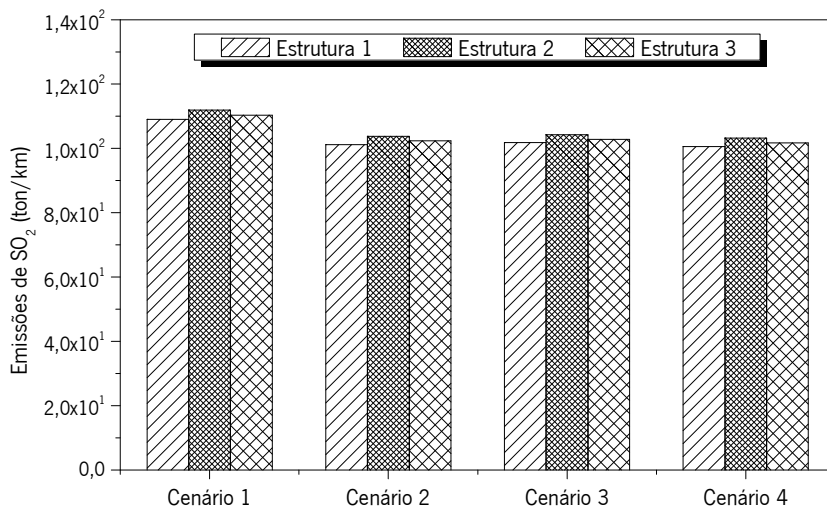


Figura 121 – Emissões globais de SO₂ no período de análise do ciclo de vida da estrada

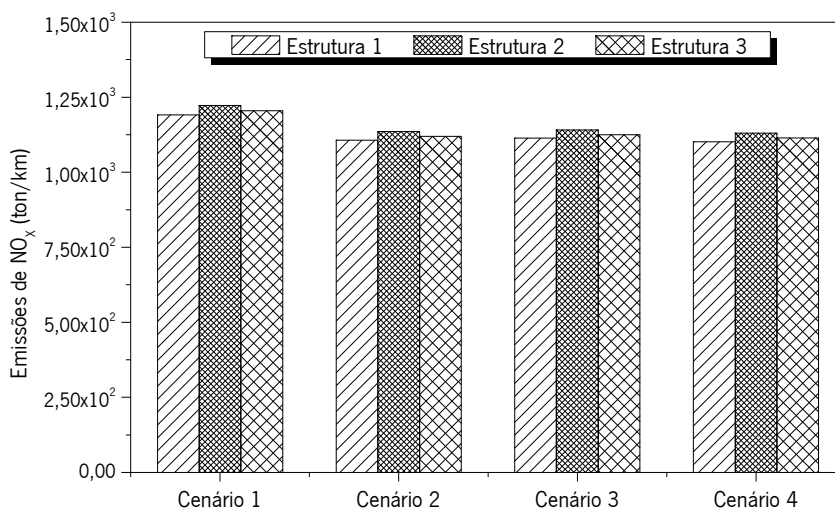


Figura 122 – Emissões globais de NO_x no período de análise do ciclo de vida da estrada

A análise destes dados permite concluir que o cenário 4 da estrutura 1 é o que apresenta menores impactes, em contraposição com cenário 1 da estrutura 2. Com efeito, a adoção de uma solução de pavimento que contemple a estrutura 1 conjugada com o cenário 4, comparativamente com a adoção da estrutura 2 e do cenário 1, permitirá reduzir, por cada quilómetro de estrada e durante o período em análise, o consumo de energia em 2,24E+08 MJ/km e as emissões de CO₂-eq, SO₂ e NO_x em 13.140, 11 e 120 toneladas, respetivamente.

Os dados apresentados permitem desde já perceber que a fase de utilização, dada a sua ordem de grandeza, tem uma influência nos impactes (consumo de energia e emissões) muito maior que as fases de construção e conservação da estrada. Esta é uma conclusão bastante óbvia, dadas as

semelhanças entre os gráficos dos impactes resultantes da utilização da estrada (Figuras 115 a 118) e os gráficos dos impactes globais no período de análise do seu ciclo de vida (Figuras 119 a 122), mas que se torna mais evidente com a análise dos dados apresentados no Quadro 32. Com efeito, para os cenários estudados, as atividades de construção e manutenção não representam sequer 0,2% do consumo de energia e das emissões de CO₂-eq e de NO_x previstas para o período do ciclo de vida em análise. Relativamente às emissões de SO₂, estas atividades já apresentam um contributo maior, não ultrapassando, no entanto, os 0,55% (valor máximo verificado no caso do cenário 2 da estrutura 1).

Quadro 32 – Influência das atividades de construção e conservação nos impactes do ciclo de vida da estrada

Estrutura	Cenário	Consumo de energia (%)	Emissões (%)		
			CO ₂ -eq	SO ₂	NO _x
1	1	0,16	0,13	0,46	0,12
	2	0,18	0,15	0,55	0,14
	3	0,17	0,14	0,51	0,14
	4	0,12	0,10	0,41	0,10
2	1	0,16	0,13	0,45	0,12
	2	0,17	0,14	0,52	0,13
	3	0,16	0,13	0,50	0,13
	4	0,11	0,10	0,39	0,10
3	1	0,16	0,13	0,45	0,12
	2	0,16	0,14	0,52	0,13
	3	0,16	0,13	0,49	0,13
	4	0,11	0,10	0,38	0,09

Comprova-se assim a importância de se considerar a fase de utilização das estradas nas análises do seu ciclo de vida, devendo as escolhas, numa perspetiva ambiental, recair sobre pavimentos que apresentem melhores desempenhos a este nível.

8.5.6. Influência do nível de tráfego nos resultados obtidos

Os resultados obtidos ficam assim bastante aquém dos dados apresentados no Capítulo 3, e que davam conta de que as atividades de construção e conservação seriam responsáveis por 2 a 5% do consumo total de energia imputável a uma estrada (EAPA/Eurobitume, 2004).

Parte das diferenças verificadas entre os valores obtidos e aqueles que são propostos pela bibliografia, poderá ser explicada pela não contabilização no presente estudo de algumas atividades de construção prévias, como os movimentos de terras, ou a construção de obras de arte, como pontes e viadutos, que certamente implicarão consumos significativos.

Sendo expectável que a redução dos impactes imputáveis à utilização da estrada devido a uma redução do tráfego seja mais significativa, em termos percentuais, que a redução dos impactes imputáveis às atividades de construção e manutenção, devido à menor espessura necessária das camadas que constituem esse pavimento, decidiu-se avaliar também a influência que o nível de tráfego teria nas conclusões anteriormente apresentadas. Para tal, procedeu-se a uma redução de 90% do tráfego apresentado no Quadro 29, passando-se assim a ter um tráfego da classe T5, e dimensionou-se novamente o pavimento da estrutura 1 (que serviu de termo comparativo).

As dimensões obtidas para o dimensionamento com o tráfego agora considerado ($9,83 \times 10^6$ eixos-padrão de 80 kN) foram 15 cm para cada camada granular, 8 cm para uma camada de base em macadame betuminoso e 4 cm para a camada de desgaste (com mistura AC 14 surf (BB)).

Relativamente às atividades de conservação, para a presente análise considerou-se apenas o cenário 2, por consistir na adoção de uma estratégia intermédia no que diz respeito ao número e frequência de realização destas atividades.

Para a previsão da evolução da qualidade do pavimento utilizaram-se, uma vez mais, os resultados obtidos por Rodrigues (2013) para a mesma classe de tráfego (agora T5) e de fundação (F3), encontrando-se esses resultados apresentados na Figura 123.

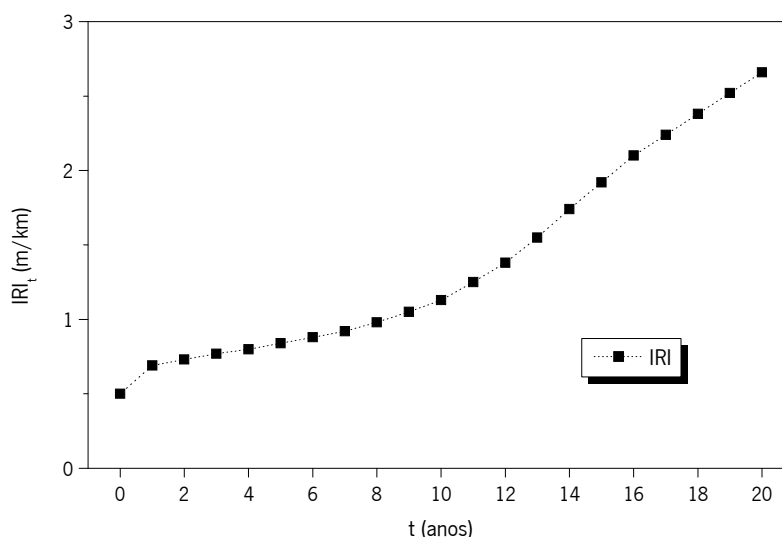


Figura 123 – Previsão da irregularidade no final do ano t , IRI_t (m/km), para um pavimento com fundação F3 e classe de tráfego T5 (adaptado de Rodrigues (2013))

Os resultados obtidos para as diferentes fases do ciclo de vida deste pavimento encontram-se no Quadro 33.

Quadro 33 – Impactes das diversas fases do ciclo de vida do pavimento (classe de tráfego T5)

Fase do ciclo de vida	Consumo de energia (MJ/km)	Emissões (ton/km)		
		CO ₂ -eq	SO ₂	NO _x
Construção	1,21E+06	7,39E+01	1,27E-01	3,85E-01
Conservação	2,79E+06	1,50E+02	2,72E-01	7,59E-01
Utilização	3,16E+08	2,12E+04	9,94E+00	1,09E+02

A influência de cada uma destas fases no resultado global de cada um dos fatores analisados é assim apresentada no Quadro 34.

Quadro 34 – Influência das diversas fases do ciclo de vida do pavimento (classe de tráfego T5)

Fase do ciclo de vida	Consumo de energia (%)	Emissões (%)		
		CO ₂ -eq	SO ₂	NO _x
Construção	0,38	0,34	1,23	0,35
Conservação	0,87	0,70	2,63	0,69
Utilização	98,75	98,96	96,14	98,96

Conclui-se assim que, para um nível de tráfego menor (classe T5) a influência, no ciclo de vida do pavimento, das atividades de construção e conservação do pavimento, aumenta face aos resultados das análises anteriores (para uma classe de tráfego T1). Enquanto a média dos valores apresentados no Quadro 32 indicava uma influência das atividades de construção e conservação no consumo de energia e nas emissões de CO₂-eq, SO₂ e NO_x de 0,15%, 0,13%, 0,47% e 0,12%, respetivamente, esses valores aumentam, com a presente análise, para 1,25%, 1,04%, 3,86% e 1,04%.

Apesar desta subida, a influência do consumo de energia continua ainda inferior ao preconizado na bibliografia anteriormente referida. Considerando, no entanto, outras atividades imputáveis à construção, tais como terraplenagens e construção de obras de arte e sistemas de drenagem, será expectável que essa influência atinja o intervalo de 2 a 5% anteriormente indicado.

8.6. Análise de custos

Para melhor comparar as alternativas em estudo, importa também quantificar os custos inerentes a cada uma delas. Apresentam-se de seguida os resultados dessa quantificação, determinados com recurso à metodologia desenvolvida e apresentada no Capítulo 4. Esses custos são inicialmente divididos em dois tipos (imputáveis às administrações rodoviárias e imputáveis aos utentes), sendo depois apresentados e comparados os custos totais de cada alternativa.

8.6.1. Custos imputáveis às administrações rodoviárias

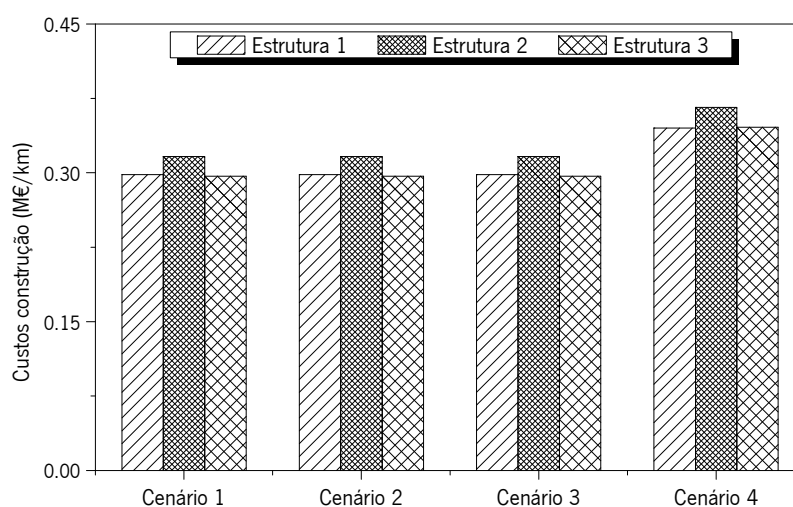
Como custos imputáveis às administrações rodoviárias consideraram-se, simplificadaamente, os decorrentes das operações de construção e de conservação a efetuar ao longo dos 40 anos do período de análise.

Os principais custos unitários considerados na presente análise são apresentados no Quadro 35, os quais, no caso de materiais e misturas, incluem o seu fornecimento e aplicação.

Quadro 35 – Principais custos unitários considerados

Rúbrica	Custo unitário
Betão Betuminoso em Camada de Desgaste	160 €/m ³
Betão Betuminoso em Camada de Desgaste c/ 10% RAP	150 €/m ³
Betão Betuminoso Drenante	190 €/m ³
Betão Betuminoso Drenante c/ 10% RAP	180 €/m ³
Betão Betuminoso Rugoso	180 €/m ³
Betão Betuminoso Rugoso c/ 10% RAP	170 €/m ³
Macadame Betuminoso	110 €/m ³
Macadame Betuminoso c/ 50% RAP	85 €/m ³
Camada de base granular	30 €/m ³
Camada de sub-base granular	29 €/m ³
Fresagem de camadas betuminosas	65 €/m ³
Microaglomerado Betuminoso a Frio	1,10 €/m ²
Regas de colagem	1,40 €/m ²
Granalhagem	2,70 €/m ²
Limpeza e aspiração dos poros	2,70 €/m ²
Selagem de fendas	5,00 €/m ²

Os valores resultantes da previsão dos custos das operações de construção e de conservação, bem como o total estimado para os custos dessas operações, são apresentados nas Figuras 124 a 126.

**Figura 124** – Custos estimados para as operações de construção inicial da estrada

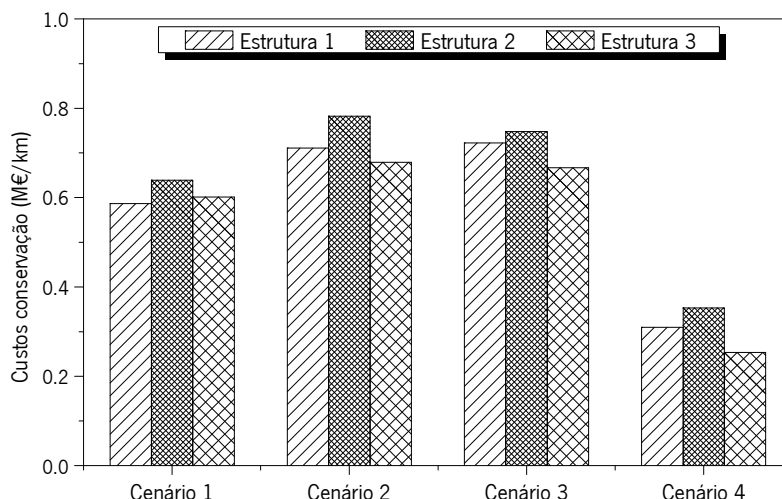


Figura 125 – Custos estimados para as operações de conservação no período em análise

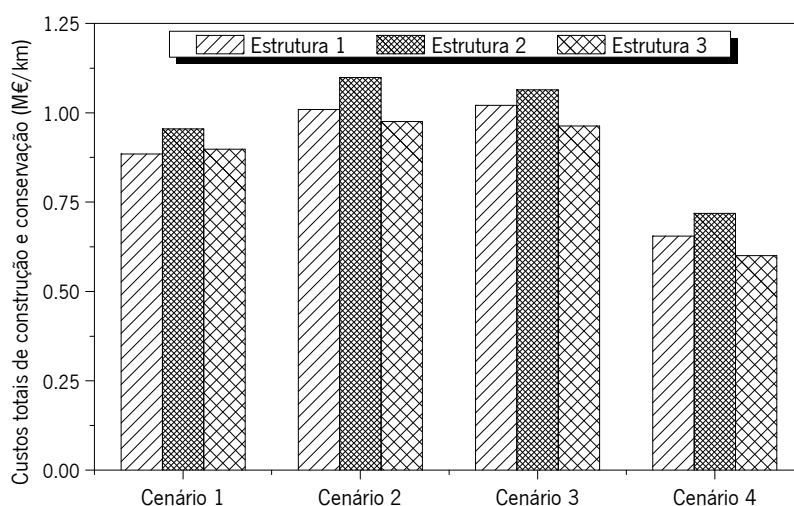


Figura 126 – Custos totais estimados para as operações de construção e conservação

Da comparação entre estruturas de pavimento, facilmente se conclui que a estrutura 2 é a mais dispendiosa, tanto ao nível da construção como da conservação, seguida da estrutura 1 e da 3, que surge como a mais económica.

Comparando os custos entre cenários, estes apresentam tendências diferentes para as operações de construção e conservação. Relativamente aos custos da construção, estes só diferem para o cenário 4, sendo, naturalmente, os mesmos para cada estrutura, independentemente de se tratar do cenário 1, 2 ou 3. Já relativamente às operações de conservação, os cenários surgem ordenados por ordem decrescente dos custos destas operações pela sequência 2, 3, 1 e 4.

Efetuada uma comparação dos custos totais imputáveis às administrações rodoviárias (relativos às operações de construção e conservação), estes surgem ordenados pela mesma ordem referida anteriormente para as operações de conservação. Com efeito, considerando a média dos custos das três estruturas, o cenário que conduzirá a maiores custos de construção e conservação é o 2, seguido do cenário 3, que permite uma redução dos custos de 1,15% (diminuição de 11.826,00 €/km). Segue-se o cenário 1, que permite reduzir os custos em 11,21% (diminuição de 115.266,00 €/km), e por fim, o cenário 4 que, apesar de implicar uma construção inicial mais dispendiosa, permite, de uma forma global, poupanças na ordem dos 36% (permite, em média, reduzir os custos em 370.176,00 €/km).

8.6.2. Custos imputáveis aos utentes

Existem diversos custos que podem ser imputados aos utentes, nomeadamente os decorrentes de atrasos devidos a obras de conservação da estrada. No presente estudo optou-se por considerar apenas os custos relativos à circulação em situações normais e resultantes, unicamente, do consumo de combustível.

Para tal, a metodologia parte dos valores do consumo de combustível anteriormente estimado e, tendo em conta que em 2015 as vendas de gasóleo, gasolina sem chumbo 95 e gasolina sem chumbo 98 representaram, respetivamente, 79,70%, 18,83% e 1,47% das vendas de combustível em Portugal (DGEG, 2016), e considerando a média dos preços destes 3 combustíveis (1,186 €/l, 1,429 €/l, e 1,488 €/l, respetivamente) praticados durante esse ano em Portugal (DGEG, 2016), procede a uma estimativa dos custos que o consumo desse combustível comportará ao longo dos 40 anos de análise (Quadro 36). Esta estimativa pretende apenas estabelecer uma comparação entre os diferentes cenários, não tendo o objetivo de prever esses custos com precisão, pois considera que as percentagens de vendas de cada tipo de combustível e o seu preço médio se manteriam inalterados durante os 40 anos, o que não é expectável atendendo às grandes variações que se tem registado ultimamente nos seus preços.

Quadro 36 – Estimativa dos custos associados ao consumo de combustível durante o período em análise

Estrutura	Cenário	Custos em gasóleo (€/km)	Custos em gasolina s/chumbo 95 (€/km)	Custos em gasolina s/chumbo 98 (€/km)	Custos totais (€/km)
1	1	89.417.320,11	25.454.301,74	2.069.183,02	116.940.804,86
	2	85.950.579,08	24.467.429,49	1.988.960,06	112.406.968,63
	3	86.335.000,87	24.576.862,30	1.997.855,87	112.909.719,04
	4	85.747.444,57	24.409.603,47	1.984.259,38	112.141.307,42
2	1	91.768.995,63	26.123.749,88	2.123.602,53	120.016.348,03
	2	88.211.079,31	25.110.922,88	2.041.269,71	115.363.271,91
	3	88.425.111,23	25.171.851,05	2.046.222,57	115.643.184,85
	4	88.002.602,36	25.051.576,05	2.036.445,40	115.090.623,81
3	1	90.499.269,68	25.762.298,79	2.094.220,13	118.355.788,60
	2	86.990.581,09	24.763.485,39	2.013.026,48	113.767.092,95
	3	87.201.651,64	24.823.570,54	2.017.910,81	114.043.132,99
	4	86.784.988,65	24.704.959,68	2.008.268,92	113.498.217,24

Para permitir uma interpretação mais imediata destes resultados, na Figura 127 encontram-se representados os custos totais da fase de utilização da estrada, estimados com base nas previsões de consumo de combustível.

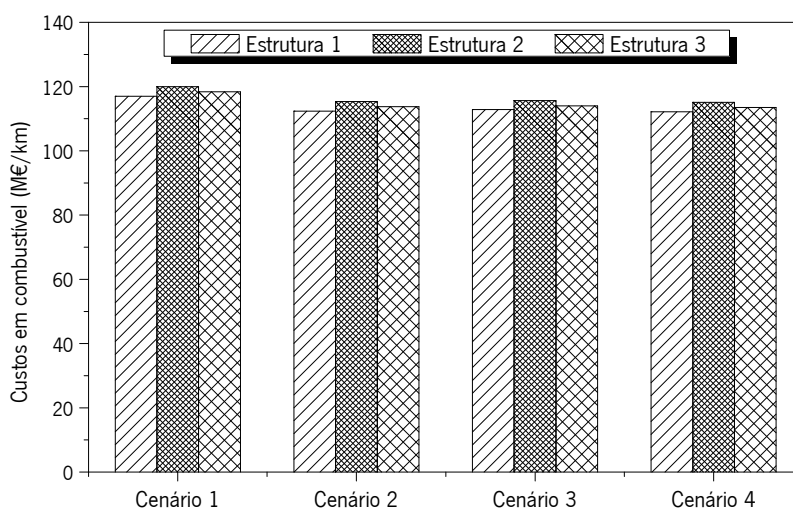


Figura 127 – Custos totais estimados do consumo de combustível no período em análise

Os dados confirmam assim não haver diferenças significativas entre os cenários 2, 3 e 4 em termos de custos de utilização, destacando-se apenas a diferença do cenário 1 para estes, dado implicar um acréscimo médio dos custos de combustível de 4,01%.

De referir também a diferença entre o cenário que implica um maior consumo de combustível (cenário 1 da estrutura 2) e o cenário menos oneroso (cenário 4 da estrutura 1), a qual atinge valores próximos dos 8 milhões de euros (7,88 M€) por quilómetro de estrada, representando uma poupança de 6,56% face aos custos do cenário mais dispendioso. Multiplicando este valor pela extensão da estrada, facilmente se atingem poupanças consideráveis, não só em termos económicos, mas também ambientais, facto que vem assim reforçar a importância da realização de uma escolha criteriosa, quer do tipo de pavimento, quer das estratégias de conservação a adotar.

8.6.3. Custos globais

Com a soma dos custos das operações de construção e conservação da estrada (Quadro B.9, do Anexo B) com os custos de combustível determinados para o tráfego estimado durante os 40 anos em análise (Quadro 36) obtiveram-se os custos globais imputáveis a cada solução de pavimento em estudo, os quais se apresentam na Figura 128.

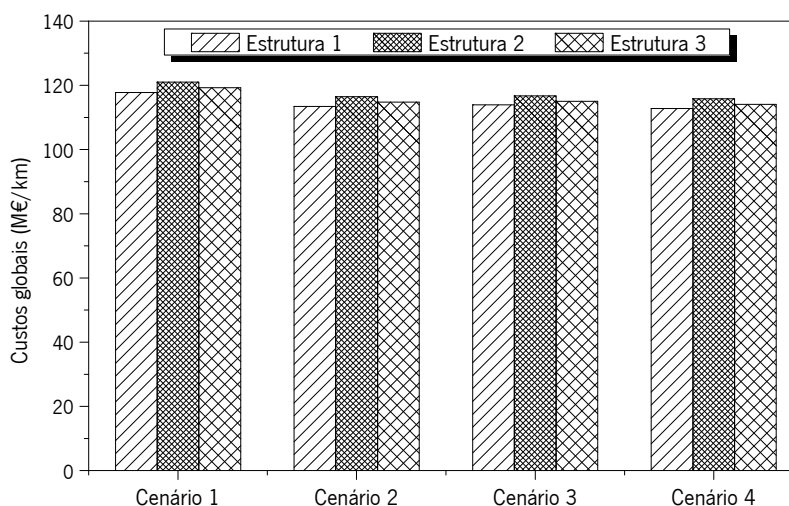


Figura 128 – Custos globais imputáveis às diferentes estruturas e cenários em estudo

Os resultados assim obtidos demonstram que a fase de utilização da estrada é, sem qualquer dúvida, a que mais influencia os custos, apresentando valores, em média, mais de 130 vezes superiores aos custos da construção e manutenção.

Mantêm-se assim as conclusões apresentadas na secção 8.6.2, nomeadamente, as semelhanças de custos entre os cenários 2, 3 e 4, e um acréscimo dos custos do cenário 1 relativamente à média dos outros três (neste caso, um aumento de 3,99%).

O cenário que implica maiores custos, tal como apresentado para a estimativa do consumo de combustível, continua a ser o cenário 1 da estrutura 2, e o cenário com menores custos continua a ser o cenário 4 da estrutura 1, no entanto, a diferença entre eles, em termos de custos globais, é maior, atingindo os 8,18 M€/km, aumentando a percentagem da redução dos custos globais para 6,76%.

Do exposto conclui-se que a escolha da solução de pavimento a adotar permitirá poupanças percentuais maiores para as administrações rodoviárias. No entanto, a poupança em combustível (no conjunto de todos os utilizadores) poderá atingir valores muito superiores. Numa perspetiva económica a administração rodoviária poderia assim optar pela estrutura 3, com a adoção da estratégia de conservação prevista para o cenário 4, por ser aquela que implicaria menores custos de construção e conservação, enquanto para os utentes, a solução mais vantajosa seria a que conjuga o cenário 4 com a estrutura 1. Estando a escolha da estrutura de pavimento a adotar naturalmente dependente da ponderação de diversos fatores, a principal conclusão a reter será a de que, em termos de custos, o cenário 4 será o mais favorável quer para as administrações rodoviárias, quer para os utilizadores da estrada.

8.7. Conclusões da análise da sustentabilidade das diferentes alternativas durante o período de análise

No presente capítulo procedeu-se à análise de três estruturas de pavimento, cuja composição diferia apenas na mistura utilizada na camada de desgaste. Foram também definidos quatro cenários, cada um considerando uma determinada estratégia de conservação. Desses cenários, os três primeiros previam a construção inicial das mesmas estruturas de pavimento, residindo as diferenças entre eles

no tipo e frequência das atividades de conservação a realizar, enquanto o quarto cenário considerava a construção de um pavimento mais espesso (pavimento perpétuo).

A análise da sustentabilidade destas estruturas foi realizada através da metodologia apresentada no Capítulo 4. Nesta análise pretendeu-se ter em conta as diversas fases do ciclo de vida de uma estrada, nomeadamente a fase de utilização que é omissa num número significativo das metodologias existentes para avaliação do ciclo de vida de pavimentos rodoviários. Para tal, estimou-se o consumo de combustível durante o período de análise, baseando-se as diferenças de consumo nos resultados obtidos experimentalmente e apresentados no Capítulo 7, bem como em modelos de previsão da qualidade dos pavimentos, os quais se ajustaram em função das estratégias de conservação consideradas.

A fase do fim de vida não foi considerada por se ter admitido que o pavimento continuaria em serviço depois do período de 40 anos considerado. Uma vez que após esses 40 anos o valor residual de cada pavimento seria diferente, dadas as características de cada cenário, optou-se antes por impor a todas as soluções a reposição das características iniciais do pavimento, evitando-se assim que eventuais diferenças na determinação do valor residual dos diferentes cenários apresentados pudessem influenciar as conclusões.

Os resultados obtidos permitiram, desde logo, confirmar a importância da fase de utilização das estradas nas análises do seu ciclo de vida, ficando evidente a supremacia desta fase face às restantes, quer em termos de impactes ambientais, quer em termos de custos.

Em termos de impactes ambientais, a estrutura 2 é que apresenta os maiores, seguida da estrutura 3 e da estrutura 1. Quanto aos cenários, o cenário 1 é o que apresenta maiores valores de consumos e emissões, sendo os restantes bastante próximos entre eles. Numa análise geral, o cenário 4 da estrutura 1 é o que apresenta menores valores de consumos e emissões, enquanto o cenário 1 da estrutura 2 é o que apresenta os maiores valores. Estes dois cenários atingem diferenças consideráveis em termos de impactes ambientais, permitindo a escolha do cenário com menores impactes reduzir, por exemplo, 13.140 toneladas de CO₂-eq (que agrega os diferentes gases com efeito de estufa) por cada quilómetro de pavimento.

Em termos de custos, as tendências mantêm-se, sendo o cenário 1 da estrutura 2 o que implica, numa análise global, o dispêndio de valores mais elevados, enquanto o cenário 4 da estrutura 1 será o que obrigará a menores custos, permitindo poupanças superiores a 8 milhões de euros por quilómetro de pavimento.

Conclui-se assim que, das soluções de pavimento estudadas, aquela que implicaria menores impactes ambientais e económicos seria a que prevê a construção de um pavimento perpétuo com uma camada de desgaste convencional (AC 14 surf (BB)), a qual deveria ser substituída de 10 em 10 anos, prevendo-se a incorporação de 10% de material reciclado nas misturas a aplicar na substituição dessas camadas.

CAPÍTULO 9

CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

9.1. Conclusões

Durante o ciclo de vida dos pavimentos rodoviários existem impactes ambientais consideráveis, sendo que a sua fase de utilização por parte dos utentes implica o consumo de avultadas quantidades de combustíveis fósseis, os quais são cada vez mais escassos. Assim, o trabalho apresentado neste documento pretendeu contribuir em especial para a compreensão da influência que a resistência ao rolamento pode ter durante a fase de utilização de uma estrada, integrando essa componente numa nova metodologia de análise do ciclo de vida de modo a poder analisar a sustentabilidade de diferentes materiais e estruturas rodoviárias.

De facto, embora a generalidade das metodologias de análise do ciclo de vida dos pavimentos rodoviários atuais se concentrem nas fases de extração, produção, transporte e aplicação dos materiais, relegando para segundo plano a fase de utilização, a verdade é que as consequências da construção de estradas e pavimentos rodoviários não se limitam ao período em que são construídos, mas prolongam-se durante toda a sua vida. Aliás, tendo em consideração o consumo de combustíveis por parte dos utentes das estradas na fase de utilização, depreende-se que essa fase pode ter um peso significativo no ciclo de vida dos pavimentos, quer em termos ambientais (devido ao consumo de energia e emissões gasosas libertadas para a atmosfera), quer em termos económicos (devido aos custos do combustível consumido).

Dado que a fase de utilização pode ter um elevado impacto no ciclo de vida dos pavimentos rodoviários, considerou-se que a mesma deve ganhar uma maior importância em relação às principais metodologias atualmente existentes para a sua avaliação. Assim, partindo de algumas das metodologias já existentes, desenvolveu-se outra que, além de considerar as fases anteriormente referidas, incluiu também a quantificação dos principais efeitos decorrentes da utilização das estradas. Com a metodologia desenvolvida é possível efetuar uma análise do ciclo de vida dos pavimentos mais completa e abrangente que a generalidade das metodologias existentes, permitindo quantificar, na fase de utilização, o consumo de combustível para o tráfego previsto, bem como as diferenças decorrentes da resistência ao rolamento. Para tal poderão utilizar-se dados de entrada provenientes de qualquer fonte, nomeadamente da bibliografia, bem como os resultantes de ensaios efetuados para avaliar diferenças na resistência ao rolamento de diferentes pavimentos, sendo que neste trabalho foi desenvolvido um protótipo laboratorial para o efeito.

O referido protótipo é constituído por 2 braços simétricos, com rodas nas extremidades exteriores, que giram em torno de um eixo central. Estando as rodas em contacto com a pista de ensaio (ou com o pavimento da estrada, no caso de ensaios *in situ*), o sistema desenvolvido permite determinar, de forma consistente, o consumo de energia e o esforço de torque necessários para que ocorra o movimento circular do equipamento, determinando-se assim as diferenças na resistência ao rolamento entre cada superfície de pavimento ensaiada, que serão utilizadas como dado de entrada na nova metodologia de análise do ciclo de vida.

Para se realizarem os ensaios com o protótipo, foram produzidos em laboratório quatro trechos (ou pistas) com diferentes características superficiais, cujas propriedades (PTV, ETD e MTD) tinham valores suficientemente diferentes para cobrir um leque de situações abrangente, o que viria a permitir a utilização desses resultados na metodologia desenvolvida. Algumas características desses trechos não cumpriram os valores exigidos pelo Caderno de Encargos da Estradas de Portugal, nomeadamente em termos de PTV, devido à superfície ser demasiado lisa, o que poderia colocar em causa a segurança de circulação se essas misturas fossem aplicadas em obra. No entanto, no âmbito deste trabalho esses trechos cumpriram os objetivos previstos pois permitiram avaliar a influência das características superficiais na resistência ao rolamento.

Em seguida, esses dados obtidos experimentalmente, para diferentes superfícies de pavimento e com diferentes níveis de carga e de velocidade, foram analisados com recurso a técnicas de *Data Mining*. O recurso às técnicas de *Data Mining* permitiu obter modelos com elevada precisão na previsão dos valores de torque e energia consumida, tendo-se verificado ainda que os parâmetros com maior influência em cada uma destas propriedades são a velocidade, no caso da energia, e o MTD, no caso do torque. Com base nesses modelos foi possível determinar as diferenças de consumo para quatro camadas de desgaste usualmente aplicadas na rede rodoviária nacional, e concluiu-se que a superfície que obrigaria a um menor dispêndio de energia (e, portanto, de combustível) seria a construída com uma mistura AC 14 surf 35/50 (BB). Comparativamente a esta, as outras três superfícies obrigariam a um consumo adicional de combustível de 0,34%, 1,21% e 2,63%, correspondendo, respetivamente, às camadas de desgaste construídas com Microaglomerado Betuminoso a Frio, Betão Betuminoso Rugoso e Betão Betuminoso Drenante.

Finalmente, procedeu-se à análise de um caso de estudo no qual se aplicou de uma forma integrada a metodologia de análise do ciclo de vida dos pavimentos (desenvolvida neste trabalho), comparando, num período de 40 anos, três estruturas de pavimento que diferiam apenas na camada de desgaste (cujo módulo de rigidez foi determinado experimentalmente para se garantir um dimensionamento mais realista dos pavimentos). Estas estruturas foram estudadas para um nível de tráfego T1, por se tratar de um dos níveis de tráfego mais severos do MACOPAV e que, por conseguinte, resultariam em estruturas de pavimentos mais espessas. O objetivo principal deste caso de estudo foi o de avaliar a sustentabilidade das estruturas propostas, tendo sido ainda definidos 4 cenários que consideravam diferentes estratégias de conservação. Os três primeiros cenários previam a construção do pavimento dimensionado para 20 anos, residindo as diferenças no tipo e na frequência das ações de conservação a realizar. O primeiro cenário previa apenas intervenções de 20 em 20 anos com a substituição integral das camadas betuminosas, enquanto os cenários 2 e 3 apostavam em estratégias mais preventivas ao considerarem intervenções a cada 8 ou 4 anos, respetivamente. O cenário 4 era o que mais diferia dos anteriores, prevendo, desde logo, a construção de um pavimento dimensionado para 50 anos (pavimento perpétuo) e apenas a substituição das camadas de desgaste.

Para aplicação da metodologia de análise do ciclo de vida do pavimento, ao nível da construção e conservação foram consideradas todas as atividades necessárias à extração das matérias-primas, bem como à produção, transporte e aplicação das misturas. Relativamente à fase de utilização da estrada,

esta foi considerada através da previsão da resistência ao rolamento e, conseqüentemente, do consumo de combustível. Esta previsão foi realizada com base nos resultados obtidos experimentalmente através do protótipo desenvolvido, mas também a partir de modelos de previsão da qualidade dos pavimentos, da qual dependerá também um maior ou menor consumo de combustível.

Ainda relativamente ao caso de estudo, considerou-se que no final do período de análise de 40 anos, já referido, se devia proceder à reposição das características iniciais, evitando-se assim a influência que a subjetividade na determinação do valor residual de cada pavimento poderia ter na análise global de cada solução, independentemente da estrutura ou dos cenários considerados. De facto, embora os pavimentos estudados possam continuar a ser utilizados, ao serem renovados no final desses 40 anos, a magnitude dessa última intervenção dependerá do valor residual que o pavimento apresenta nessa fase, considerando-se desta forma a fase do fim de vida do pavimento nas análises realizadas, e limitando-se assim a análise do ciclo de vida ao período considerado.

A análise das diferentes soluções de pavimento apresentadas neste caso de estudo, realizada com a metodologia desenvolvida, concluiu existir diferenças significativas entre as várias soluções, tanto em termos de impactes ambientais associados, como de custos económicos. Das estruturas analisadas, aquela que implica menores impactes ambientais é a estrutura que prevê a utilização de um Betão Betuminoso (AC 14 surf) em camada de desgaste, devido à preponderância da fase de utilização do pavimento no seu ciclo de vida e ao facto de se ter concluído ser essa a camada de desgaste que implicava um menor consumo de combustível. Relativamente aos cenários considerados, aquele que se afigura como o mais benéfico é o que prevê a construção do pavimento perpétuo, pois apesar de ser mais oneroso (em termos económicos e ambientais) no que diz respeito à construção inicial, esses impactes são bastante menores que os dos outros pavimentos no que se refere às atividades de conservação, tornando esta solução mais vantajosa.

Com efeito, a escolha entre a melhor e pior solução em análise neste caso de estudo, resultantes da combinação de uma estrutura de pavimento com determinada estratégia de conservação, poderá permitir uma redução do consumo de combustível superior a 6,37 milhões de litros durante os 40 anos analisados, bem como uma diminuição nas emissões de 13.140, 11 e 120 toneladas de CO₂-eq, SO₂ e NO_x, respetivamente. Além dos benefícios ambientais, a escolha da melhor solução de pavimento permitirá ainda poupanças superiores a 8 milhões de euros por quilómetro ao longo do período em análise, em especial graças à redução do consumo de combustível por parte dos utentes.

As análises realizadas confirmaram ainda a importância de se considerar a fase de utilização nas análises do ciclo de vida dos pavimentos rodoviários. Para os cenários estudados, as atividades de construção e conservação representam apenas, em média, 0,15% do consumo de energia e 0,13%, 0,47% e 0,12 % das emissões de CO₂-eq, SO₂ e de NO_x previstas. Avaliou-se também a influência da classe de tráfego nesses valores e, para uma classe de tráfego mais baixa (T5), o peso das atividades de construção e conservação já aumenta para 1,25%, 1,04%, 3,86% e 1,04%, respectivamente, constatando-se assim que o nível de tráfego condiciona os resultados da análise de ciclo de vida dos pavimentos, reduzindo um pouco a importância da fase de utilização nos pavimentos sujeitos a níveis de tráfego mais baixos.

Em resumo, neste trabalho foi possível concluir que a fase de utilização tem um peso muito significativo, de cerca de 99%, na análise da sustentabilidade dos pavimentos rodoviários, e por isso deve ser incluída na seleção das melhores alternativas construtivas para estas obras de Engenharia Civil. Assim, a metodologia de análise do ciclo de vida proposta poderá ser uma ferramenta importante na tomada de decisão futura sobre práticas de construção mais sustentáveis.

9.2. Propostas para desenvolvimentos futuros

Apesar dos trabalhos anteriormente apresentados constituírem um contributo significativo para a compreensão dos pavimentos rodoviários e da sua sustentabilidade, esta é uma temática influenciada por uma grande diversidade de fatores que interessará aprofundar no futuro, por não ser viável a consideração de todos esses fatores durante este Doutorado.

Nesse sentido, apresentam-se assim algumas propostas de desenvolvimentos futuros, que poderão ser seguidas, tanto a nível teórico como experimental.

Assim, relativamente à metodologia desenvolvida, sugere-se o estudo e inclusão de outros fatores que influenciam a fase de utilização da estrada, nomeadamente a carbonatação do betão em pavimentos rígidos, a energia consumida para iluminação, o albedo ou a produção de lixiviados, entre outros. Além disso, considera-se importante aplicar a metodologia de análise de ciclo de vida proposta em parceria com as administrações rodoviárias, nomeadamente em novos projetos de pavimentos rodoviários a realizar, aferindo-se desta forma todas as vantagens desta nova abordagem.

A nível experimental, o desenvolvimento do protótipo foi, por si só, uma atividade bastante complexa e demorada que, naturalmente, tornou inviável a utilização de outros métodos de calibração dos resultados durante o período destinado à realização deste Doutorado. O método e o equipamento desenvolvidos pretendem ser uma alternativa simples e barata para a determinação da resistência ao rolamento, mas sugere-se a realização de ensaios *in situ* que permitam correlacionar os resultados obtidos com o protótipo e os obtidos com outros métodos de avaliação. Para tal, poderá recorrer-se a outros equipamentos, nomeadamente instrumentando veículos que, circulando sobre o mesmo pavimento, permitam determinar o combustível efetivamente consumido, e assim comparar os resultados obtidos com os dois métodos.

Sugere-se ainda o estudo com o protótipo de outras superfícies e de estruturas com diferentes capacidades de carga (nomeadamente pavimentos rígidos), bem como abrangendo diferentes condições climatéricas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACPA (2007). *Green Highways: Environmentally and Economically Sustainable Concrete Pavements*, SR385P, American Concrete Pavement Association, Skokie, Illinois, USA.
- Adrian, W., Jobanputra, R. (2005). *Influence of pavement reflectance on lighting for parking lots*, Skokie, IL: Portland Cement Association. PCA R&D Serial No. 2458.
- Akbari, H., Menon, S., Rosenfeld, A. (2009). Global cooling: increasing world-wide urban albedos to offset CO₂, *Climatic Change*, Vol. 94 (3), pp. 275-286.
- Akbari, H., Pomerantz, M., Taha, H. (2001). Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas, *Solar Energy*, Vol. 70 (3), pp. 295-310.
- Akbarian, M., Moeini-Ardakani, S., Ulm, F.-J., Nazzal, M. (2012). Mechanistic Approach to Pavement-Vehicle Interaction and Its Impact on Life-Cycle Assessment, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 2306, pp. 171-179.
- Amos, D. (2006). *Pavement Smoothness and Fuel Efficiency: An Analysis of the Economic Dimensions of the Missouri Smooth Road Initiative*, Missouri Department of Transportation, Organizational Results Research Report, Report No. OR 07-005.
- Araújo, J.P.C., Oliveira, J.R.M., Silva, H.M.R.D. (2012). *Sustainability comparison between pavements with conventional and recycled hot mix asphalt*, WasteEng 12 - 4th International Conference on Engineering for Waste and Biomass Valorisation, Porto, Portugal.
- Araújo, J.P.C., Oliveira, J.R.M., Silva, H.M.R.D. (2014). The importance of the use phase on the LCA of environmentally friendly solutions for asphalt road pavements, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Vol. 32, pp. 97-110.
- ARRA (2001). *Basic Asphalt Recycling*, Asphalt Recycling and Reclaiming Association, EUA.
- ASCE (2008). *ETHICS - Guidelines for Professional Conduct for Civil Engineers*, American Society of Civil Engineers.
- Athena Institute (2006). *A life cycle perspective on concrete and asphalt roadways: embodied primary energy and global warming potential*, Ottawa, Canada: Cement Association of Canada.
- Avrenli, K.A., Benekohal, R.F., Medina, J.C. (2012). *LED Roadway Lighting, Volume 1: Background Information*, Illinois Center for Transportation, University of Illinois at Urbana-Champaign.

- AzariJafari, H., Yahia, A., Ben Amor, M. (2016). Life cycle assessment of pavements: reviewing research challenges and opportunities, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 112, Part 4, pp. 2187-2197.
- Azevedo, C.S., Santos, M.F. (2005). *Data Mining - Descoberta de Conhecimento em Bases de Dados*, FCA - Editora Informática.
- Baptista, A. (2006). *Misturas Betuminosas Recicladas a Quente em Central. Contribuição para o seu estudo e aplicação*, Tese de Doutoramento, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Barbosa, T.M.P.S.D. (2006). *Reabilitação estrutural de um pavimento com camada drenante*, Universidade do Minho, Guimarães.
- Barkenbus, J.N. (2010). Eco-driving: An overlooked climate change initiative, *Energy Policy*, Vol. 38 (2), pp. 762-769.
- Basu, C., Das, A., Thirumalasetty, P., Das, T. (2013). Perpetual Pavement – A Boon for the Indian Roads, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, Vol. 104, pp. 139-148.
- Batista, F.A.B.A. (2004). *Novas Técnicas de Reabilitação de Pavimentos - Misturas betuminosas densas a frio*, Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Batista, F.G.M.R. (2009). *Reabilitação de pavimentos flexíveis através de reciclagem com cimento*, Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa.
- Bendtsen, H. (2004). *Rolling resistance, fuel consumption - a literature review*, Denmark.
- Bergiers, A., Goubert, L., Anfosso-Lédée, F., Dujardin, N., Ejsmont, J.A., Sandberg, U., Zöller, M. (2011). *Comparison of Rolling Resistance Measuring Equipment - Pilot Study*, MIRIAM - Models for rolling resistance In Road Infrastructure Asset Management Systems.
- Bernucci, L.B., Motta, L.M.G.d., Ceratti, J.A.P., Soares, J.B. (2008). *Pavimentação Asfáltica - Formação básica para engenheiros*, PEROBRAS; ABEDA, Rio de Janeiro.
- Berthiaume, R., Bouchard, C. (1999). Exergy analysis of the environmental impact of paving material manufacture, *Trans Can Soc Mech Eng*, Vol. 23, pp. 187–196.
- Bester, C. (1984). The effect of pavement type and condition on the fuel consumption of vehicles, *Transportation Research Record 1000*, Vol. Transportation Research Board, Washington.
- Bragança, L., Mateus, R. (2011). *Avaliação do ciclo de vida dos edifícios - impacte ambiental de soluções construtivas*, Ed. autor.
- Branco, F., Pereira, P., Picado Santos, L. (2005). *Pavimentos Rodoviários*, Edições Almedina.
- Brandt, H.C.A., De Groot, P.C. (2001). Aqueous leaching of polycyclic aromatic hydrocarbons from bitumen and asphalt, *Water Research*, Vol. 35 (17), pp. 4200-4207.
- Brandtley, A.S., Townsend, T.G. (1999). Leaching of pollutants from reclaimed asphalt pavement, *Environmental Engineering Science*, Vol. 16 (2), pp. 105-116.

- Capros, P., Mantzos, L., Papandreou, V., Tasios, N. (2008). *Model-based Analysis of the 2008 EU Policy Package on Climate Change and Renewables*, Primes Model - E3MLab/NTUA; Acedido em 25 de fevereiro de 2016.
- Chan, A.W.C. (2007). *Economic and environmental evaluations of life cycle cost analysis practice: a case study of Michigan DOT pavement projects*, Dissertação de Mestrado, University of Michigan.
- Chang, J.-R., Su, Y.-S., Huang, T.-C., Kang, S.-C., Hsieh, S.-H. (2009). *Measurement of the International Roughness Index (IRI) Using an Autonomous Robot (P3-A7)*, 26th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2009), Austin, Texas, U.S.A.
- Chehovits, J., Galehouse, L. (2010). Energy Usage and Greenhouse Gas Emissions of Pavement Preservation Processes for Asphalt Concrete Pavements, *First International Conference on Pavement Preservation*, Newport Beach, California.
- Chen, F., Zhu, H., Yu, B., Wang, H. (2016). Environmental burdens of regular and long-term pavement designs: a life cycle view, *International Journal of Pavement Engineering*, Vol. 17 (4), pp. 300-313.
- Chiu, C.-T., Hsu, T.-H., Yang, W.-F. (2008). Life cycle assessment on using recycled materials for rehabilitating asphalt pavements, *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 52 (3), pp. 545-556.
- CIB (1999). *Agenda 21 on sustainable construction*, CIB Report Publication 237. ISBN: 90-6363-015-8.
- 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, pp. 39-74, Ann Arbor - Michigan.
- Cortes, C., Vapnik, V. (1995). Support-Vector Networks, *Machine Learning*, Vol. 20 (3), pp. 273-297.
- Cortez, P. (2010). Data Mining with Neural Networks and Support Vector Machines Using the R/rminer Tool, *Advances in Data Mining Applications and Theoretical Aspects*, p. 572-583, Springer Berlin Heidelberg.
- Cortez, P. (2015). *A tutorial on using the rminer R package for data mining tasks*, Teaching Report, Department of Information Systems, ALGORITMI Research Centre, Engineering School, University of Minho, Guimarães, Portugal.
- Costa, H. (2008). *Análise de Custos do Ciclo de Vida Relativa a Pavimentos Rodoviários Flexíveis.*, Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Cunha, C.M. (2010). *Reciclagem de Pavimentos Rodoviários Flexíveis - Diferentes Tipos de Reciclagem*, Dissertação de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.
- DCS (2008). PCI Points Lost per Year, Department of Community Services – Transportation – Road Services, Multnomah County, Oregon.

- Descornet, G. (1990). *Road-surface influence on tire rolling resistance*, In Meyer, W. and Reichert, J. (Eds.), *Surface Characteristics of Roadways: International Research and Technologies*, ASTM STP 1031, pp. 401-415.
- DGC (2002). *Orden circular 10/2002 sobre secciones de firme (Instrucción 6.1 y 2-IC de Secciones de firme) y capas estructurales de firmes*, Dirección General de Carreteras (DGC), Madrid.
- DGEG (2016). *Combustíveis fósseis - estatísticas rápidas - n°127 - dezembro de 2015*, Direção Geral de Energia e Geologia.
- Dinis-Almeida, M., Castro-Gomes, J., Antunes, M.d.L. (2012). Mix design considerations for warm mix recycled asphalt with bitumen emulsion, *Construction and Building Materials*, Vol. 28 (1), pp. 687-693.
- Diniz, J.B. (2009). *Desenvolvimento e validação de um software para simulação de consumo de combustível veicular*, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- DNER (1998). *Manual de reabilitação de pavimentos asfálticos*, Ministério dos Transportes, Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Diretoria de Desenvolvimento Tecnológico, Rio de Janeiro, Brasil.
- du Plessis, H., Visser, A., Curtayne, P. (1990). *Fuel consumption of vehicles as affected by road-surface characteristics*, In Meyer, W. and Reichert, J. (Eds.), *Surface Characteristics of Roadways: International Research and Technologies*, ASTM STP 1031, pp. 480-496.
- EAPA (1998). *Directivas Ambientais Sobre as Melhores Técnicas Disponíveis (BAT) para a Produção de Misturas Betuminosas*, European Asphalt Pavement Association, Holanda (traduzido para português pela APORBET).
- EAPA/Eurobitume (2004). *Environmental Impacts and Fuel Efficiency of Road Pavements*, EAPA/Eurobitume, Industry Report, March 2004.
- ECRPD (2010). *Energy Conservation in Road Pavement Design, Maintenance and Utilisation*.
- EEA (2015). *Annual European Union greenhouse gas inventory 1990–2013 and inventory report 2015*, European Environment Agency, Luxemburgo.
- Ejsmont, J.A. (1990). *Tire/road noise and rolling resistance – is there a trade-off?*, International Tire/road Noise Conference - INTROC 90, Gothenburg, Sweden.
- EN 12697-2 (2002). *Bituminous mixtures - Test methods - Part 2: Determination of particle size distribution*, European Standard. European Committee for Standardization (CEN). Brussels.
- EN 12697-26 (2012). *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 26: Stiffness*, European Standard. European Committee for Standardization (CEN). Brussels.
- EN 12697-39 (2012). *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 39: Binder content by ignition*, European Standard. European Committee for Standardization (CEN). Brussels.

- EN 13036-4 (2011). *Road and airfield surface characteristics - Test methods - Part 4: Method for measurement of slip/skid resistance of a surface: The pendulum test*, European Standard. European Committee for Standardization (CEN). Brussels.
- EN 13108-7 (2006). *Bituminous mixtures - Material specifications - Part 7: Porous Asphalt*, European Standard. European Committee for Standardization (CEN). Brussels.
- EN 13108-20 (2006). *Bituminous mixtures - Material specifications - Part 20: Type Testing*, European Standard. European Committee for Standardization (CEN). Brussels.
- EN 13285 (2010). *Unbound mixtures; Specifications*, European Standard. European Committee for Standardization (CEN). Brussels.
- EN 13808 (2013). *Bitumen and bituminous binders - Framework for specifying cationic bituminous emulsions*, European Standard. European Committee for Standardization (CEN). Brussels.
- Engelsen, C.J., Mehus, J., Pade, C., Sæther, D.H. (2005). *Carbon dioxide uptake in demolished and crushed concrete: CO₂ uptake during the concrete life cycle*, Oslo, Norway: Nordic Innovation Centre. NIC Project No. 03018, Project report 395-2005.
- EP (2014a). *Caderno de Encargos Tipo Obra: 14.03 - Pavimentação. Características dos materiais*, Estradas de Portugal, S.A., Almada.
- EP (2014b). *Caderno de Encargos Tipo Obra: 15-03 - Pavimentação. Métodos construtivos*, Estradas de Portugal, S.A., Almada.
- European Commission (2016). *EU Ecolabel*, http://ec.europa.eu/environment/ecolabel/index_en.htm; Acedido em 25 de janeiro de 2016.
- Fernández-Sánchez, G., Berzosa, Á., Barandica, J.M., Cornejo, E., Serrano, J.M. (2015). Opportunities for GHG emissions reduction in road projects: a comparative evaluation of emissions scenarios using CO₂NSTRUCT, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 104, pp. 156-167.
- Ferrão, P.C. (1998). *Introdução à gestão ambiental - A avaliação do ciclo de vida de produtos*, IST Press.
- Figueiredo, N. (2011). *Avaliação e Conservação de Pavimentos Rodoviários Municipais com Baixo Tráfego - Contribuição para uma Metodologia de Apoio*, Dissertação de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, Coimbra.
- Francisco, A. (2008). *Inventário do Ciclo de Vida de Pavimentos Rodoviários. Estudo de caso em pavimentos flexível e semi-rígido*, Dissertação de Mestrado, Universidade da Beira Interior, Covilhã.
- Gajda, J. (2001). *Absorption of atmospheric carbon dioxide by Portland cement concrete (revised in 2006)*, Skokie, IL: Portland Cement Association. PCA R&D Serial No. 2255a.
- Gent, A.N., Walter, J.D. (2006). *The Pneumatic Tire*, National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA), Washington, D.C., USA.

- Gomes, P., Lopes, M., Martins, H., Carvalho, J., Silva, J.V., Teixeira, P. (2011). *Custos e Benefícios, à escala local, de uma Ocupação Dispersa – Anexo 8: Custos internos e externos de Mobilidade em Portugal*, Aveiro.
- GRAMME (2009). *Les Applications Du Bitume; 3.1 Enrobé drainant*, <http://www.gramme.be/unite9/pmwikiOLD/pmwiki.php?n=PrGC0910.LesApplicationsDuBitume>; Acedido em 29 de janeiro de 2016.
- Gustafsson, M., Blomqvist, G., Hultqvist, B.A. (2013). *Wear of and particle emission from concrete pavements*, VTI, Relatório 780, Linköping, Suécia (relatório em sueco).
- HA (2006). *Design Manual for Roads and Bridges. Pavement Design*, Highways Agency (HA), HD 26/06, Volume 7, Section 2, Part 3, London.
- Haider, M., Conter, M., Glaeser, K.-P. (2011). *Discussion paper – “What are rolling resistance and other influencing parameters on energy consumption in road transport”*, MIRIAM - Models for rolling resistance In Road Infrastructure Asset Management Systems.
- Häkkinen, T. (1994). *Environmental impact of building materials*, Technical Research Centre of Finland (VTT), Espoo, Finland.
- Häkkinen, T., Mäkelä, K. (1996). *Environmental impact of concrete and asphalt pavements*, VTT, Finland: Technical Research Center of Finland. Research Notes 1752.
- Hastie, T., Tibshirani, R., Friedman, J. (2001). *The elements of statistical learning: data mining, inference and prediction*, Springer-Verlag, N.Y., USA.
- Haykin, S. (1998). *Neural Networks - A Comprehensive Foundation*, 2nd ed, Prentice-Hall, New Jersey.
- Heywood, J.B. (1988). *Internal combustion engine fundamentals*, McGraw-Hill, New York.
- Hof, T., Conde, L., Garcia, E., Iviglia, A., Jamson, S., Jopson, A., Lai, F., Merat, N., Nyberg, J., Rios, S., Sanchez, D., Schneider, S., Seewald, P., Weerd, C.v.d., Wijn, R., Zlocki, A. (2014). *D11.1: A state of the art review and users' expectations*.
- Horvath, A., Hendrickson, C. (1998). Comparison of environmental implications of asphalt and steel-reinforced concrete pavements, *Transportation Research Record*, Vol. 1626, pp. 105–113.
- Huang, Y., Bird, R., Bell, M. (2009a). A comparative study of the emissions by road maintenance works and the disrupted traffic using life cycle assessment and micro-simulation, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Vol. 14 (3), pp. 197-204.
- Huang, Y., Bird, R., Heidrich, O. (2009b). Development of a life cycle assessment tool for construction and maintenance of asphalt pavements, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 17 (2), pp. 283-296.
- Iacomussi, P., Radis, M., Rossi, G. (2015). European EMRP Projects About LED Lighting, *Energy Procedia*, Vol. 78, pp. 2675-2680.

- ICLEI (1996). *The Local Agenda 21 Planning Guide - An Introduction to Sustainable Development Planning*, International Council for Local Environmental Initiatives (ICLEI). ISBN: 0-88936-801-5.
- InIR, I.P. (2009a). *Construção e Reabilitação de Pavimentos - Ligantes Betuminosos*, Instituto de Infra-Estruturas Rodoviárias, Lisboa.
- InIR, I.P. (2009b). *Construção e Reabilitação de Pavimentos - Reciclagem de Pavimentos*, Instituto de Infra-Estruturas Rodoviárias, Lisboa.
- InIR, I.P. (2009c). *Directivas para a concepção de pavimentos - Critérios de dimensionamento*, Instituto de Infra-Estruturas Rodoviárias, Lisboa.
- InIR, I.P. (2011). *Construção e Reabilitação de Pavimentos - Agregados*, Instituto de Infra-Estruturas Rodoviárias, Lisboa.
- ISO 14040 (1997). *Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework*, International Standard. International Organization for Standardization (ISO). Geneva, Switzerland. (This standard has been revised by: ISO 14040:2006).
- ISO 14040 (2006). *Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework*, International Standard. International Organization for Standardization (ISO). Geneva, Switzerland.
- ISO 14041 (1998). *Environmental management - Life cycle assessment - Goal and scope definition and inventory analysis*, International Standard. International Organization for Standardization (ISO). Geneva, Switzerland. (This standard has been revised by: ISO 14040:2006).
- ISO 14042 (2000). *Environmental management - Life cycle assessment - Life cycle impact assessment*, International Standard. International Organization for Standardization (ISO). Geneva, Switzerland. (This standard has been revised by: ISO 14040:2006).
- ISO 14043 (2000). *Environmental management - Life cycle assessment - Life cycle interpretation*, International Standard. International Organization for Standardization (ISO). Geneva, Switzerland. (This standard has been revised by: ISO 14040:2006).
- ISO 14044 (2006). *Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines*, International Standard. International Organization for Standardization (ISO). Geneva, Switzerland.
- ISO 18164 (2005). *Passenger car, truck, bus and motorcycle tyres - Methods of measuring rolling resistance*, International Standard. International Organization for Standardization (ISO). Geneva, Switzerland.
- ISO/TR 14047 (2012). *Environmental management - Life cycle assessment - Illustrative examples on how to apply ISO 14044 to impact assessment situations*, Technical Report. International Organization for Standardization (ISO). Geneva, Switzerland.

- ISO/TR 14049 (2012). *Environmental management - Life cycle assessment - Illustrative examples on how to apply ISO 14044 to goal and scope definition and inventory analysis*, Technical Report. International Organization for Standardization (ISO). Geneva, Switzerland.
- ISO/TS 14048 (2002). *Environmental management - Life cycle assessment - Data documentation format*, Technical Specification. International Organization for Standardization (ISO). Geneva, Switzerland.
- ISO/TS 14067 (2013). *Greenhouse gases - Carbon footprint of products - Requirements and guidelines for quantification and communication*, Technical Specification. International Organization for Standardization (ISO). Geneva, Switzerland.
- ISO/TS 14071 (2014). *Environmental management - Life cycle assessment - Critical review processes and reviewer competencies: Additional requirements and guidelines to ISO 14044:2006*, Technical Specification. International Organization for Standardization (ISO). Geneva, Switzerland.
- ISO/TS 14072 (2014). *Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines for organizational life cycle assessment*, Technical Specification. International Organization for Standardization (ISO). Geneva, Switzerland.
- JAE (1995). *Manual de Concepção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional*, Junta Autónoma de Estradas - JAE (actual "Estradas de Portugal, S.A."). Almada.
- Kaloush, K.E., Carlson, J.D., Golden, J.S., Phelan, P.E. (2008). *The Thermal and Radiative Characteristics of Concrete Pavements in Mitigating Urban Heat Island Effects*, Skokie, IL: Portland Cement Association.
- Kewley, R.H., Embrechts, M.J., Breneman, C. (2000). Data strip mining for the virtual design of pharmaceuticals with neural networks, *IEEE Trans Neural Networks*, Vol. 11 (3), pp. 668-679.
- Kibert, C. (1994). *Establishing Principles and a Model for Sustainable Construction*, First International Conference on Sustainable Construction, Tampa, Florida.
- Kopperman, S., Tiller, G., Tseng, M. (1986). *ELSYM 5: Interactive Microcomputer Version : User's Manual for IBM-PC and Compatible Microcomputer*, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration.
- Kraemer, C., Val, M. (1996). *Caminos y Aeropuertos: firmes e pavimentos.*, Departamento de Transportes - E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidade Politecnica de Madrid, Madrid.
- Kriech, A.J. (1990). *Evaluation of hot mix asphalt for leachability*, Lexington, KY: Asphalt Institute.
- LaClair, T., Truemner, R. (2005). Modeling of Fuel Consumption for Heavy-Duty Trucks and the Impact of Tire Rolling Resistance, *SAE Technical Paper 2005-01-3550*.

- Laganier, R., Lucas, J. (1990). *The influence of pavement evenness and macrotexture on fuel consumption*, In Meyer, W. and Reichert, J. (Eds.), *Surface Characteristics of Roadways: International Research and Technologies*, ASTM STP 1031, pp. 454-459.
- Lagerblad, B. (2006). *Carbon dioxide uptake during concrete life cycle – state of the art*, Stockholm, Sweden: Swedish Cement and Concrete Research Institute, CBI. Nordic Innovation Centre Project Number 03018.
- LCE4ROADS (2016). *Life Cycle Engineering approach to develop a novel EU-harmonized sustainability certification system for cost-effective, safer and greener road infrastructures*, <http://ecolabelproject.eu/>; Acedido em 25 de janeiro de 2016.
- LCPC (1998). *Guide Technique LCPC-SETRA, Catalogue des Structures Types des Chaussées Neuves*, LCPC et SETRA (ed), Paris.
- Legret, M., Odie, L., Demare, D., Jullien, A. (2005). Leaching of heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons from reclaimed asphalt pavement, *Water Research*, Vol. 39 (15), pp. 3675-3685.
- Liu, R., Smartz, B.W., Descheneaux, B. (2015). LCCA and environmental LCA for highway pavement selection in Colorado, *International Journal of Sustainable Engineering*, Vol. 8 (2), pp. 102-110.
- LNEC E 391 (1993). *Betões. Determinação da resistência à carbonatação*, Especificação. Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC). Lisboa.
- Maganinho, L. (2013). *Desenvolvimento de uma base de dados de patologias para a avaliação da qualidade de pavimentos rodoviários com recurso a GPS, imagem vídeo e SIG*, Dissertação de Mestrado, Universidade da Beira Interior, Covilhã.
- Marceau, M.L., VanGeem, M.G. (2007). *Solar reflectance of concretes for LEED sustainable sites credit: heat island effect*, Skokie, IL: Portland Cement Association.PCAR&D Serial No. 2982.
- Marion, A.-M., De Lanève, M., De Grauw, A. (2005). Study of the leaching behaviour of paving concretes: quantification of heavy metal content in leachates issued from tank test using demineralized water, *Cement and Concrete Research*, Vol. 35 (5), pp. 951-957.
- Martins, F.F., Almeida, T.A.M.V. (2009). *Análise da estabilidade de taludes recorrendo a ferramentas inteligentes*, 3as Jornadas Luso-Espanholas de Geotecnia, p. 298–307, Madrid, Espanha.
- Mclean, J., Foley, G. (1998). *Road Surface Characteristics and condition: Effects on Road Users*, ARRB research report 1998/01. ARRB Transport Research LTD, Australia.
- Mensing, F., Bideaux, E., Trigui, R., Ribet, J., Jeanneret, B. (2014). Eco-driving: An economic or ecologic driving style?, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol. 38, pp. 110-121.
- Menzies, T., Zucchetto, J. (2006). *Tires and Passenger Vehicle Fuel Economy*, The National Academies Press, Washington, D.C.

- Michelin (2003). *The tyre - rolling resistance and fuel savings*, Société de Technologie Michelin, França.
- Mroueh, U.M., Eskola, P., Laine-Ylijoki, J., Wellman, K., Mäkelä, E., Juvankoski, M. (2000). *Life cycle assessment of road construction*, Helsinki, Finland: Finnish National Road Administration, Finnra Reports 17/2000.
- Mueller, S.R. (2012). The Role(s) of Pavement Management, *2012 NWPMA Conference, Northwest Pavement Management Association, Oct 23-26, 2012*, Vancouver, WA.
- Muga, H.E., Mukherjee, A., Mihelcic, J.R., Kueber, M.J. (2009). An integrated assessment of continuously reinforced and jointed plane concrete pavements, *Journal of Engineering, Design and Technology*, Vol. 7 (1), pp. 81-98.
- Munson's City (2012). *How urban design moderates heat in US cities*, <http://munsonscity.com/2012/08/27/how-urban-design-moderates-heat-in-us-cities-kalev-com/>; Acedido em 1 de fevereiro de 2016.
- N.D. Lea International Ltd. (1995). *Modelling Road Deterioration and Maintenance Effects in HDM-4*, RETA 5549-REG Highway Development and Management Research.
- Nathman, R.K. (2008). *Palate user guide, example exercise, and contextual discussion*, Dissertação de Mestrado, Universidade de Delaware, Delaware, USA.
- Nisbet, M.A., Marceau, M.L., VanGeem, M.G., Gajda, J. (2001). *Environmental life cycle inventory of Portland cement concrete and asphalt concrete pavements*, Skokie, IL: Portland Cement Association, PCA R&D Serial No. 2489.
- Nokian Tyres plc (2004). *European Tyre School – project. Supported by Leonardo da Vinci programme of European Commission*, www.tut.fi/plastics/tyreschool/index.html; Acedido em 18 de dezembro de 2015.
- Noshadravan, A., Wildnauer, M., Gregory, J., Kirchain, R. (2013). Comparative pavement life cycle assessment with parameter uncertainty, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Vol. 25 (0), pp. 131-138.
- NP EN 197-1 (2012). *Cimento; Parte 1: Composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes*, Norma Portuguesa. Instituto Português da Qualidade (IPQ). Caparica.
- NP EN 197-2 (2014). *Cimento; Parte 2: Avaliação da conformidade*, Norma Portuguesa. Instituto Português da Qualidade (IPQ). Caparica.
- NP EN 206-1 (2007). *Betão; Parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade*, Norma Portuguesa. Instituto Português da Qualidade (IPQ). Caparica.
- NP EN 459-1 (2015). *Cal de construção; Parte 1: Definições, especificações e critérios de conformidade*, Norma Portuguesa. Instituto Português da Qualidade (IPQ). Caparica.

- NP EN 934-2 (2009). *Adjuvantes para betão, argamassa e caldas de injeção; Parte 2: Adjuvantes para betão; Definições, requisitos, conformidade, marcação e etiquetagem*, Norma Portuguesa. Instituto Português da Qualidade (IPQ). Caparica.
- NP EN 1008 (2003). *Água de amassadura para betão; Especificações para a amostragem, ensaio e avaliação da aptidão da água, incluindo água recuperada nos processos da indústria de betão, para o fabrico de betão*, Norma Portuguesa. Instituto Português da Qualidade (IPQ). Caparica.
- NP EN 12591 (2011). *Betumes e ligantes betuminosos; Especificações para betumes de pavimentação*, Norma Portuguesa. Instituto Português da Qualidade (IPQ). Caparica.
- NP EN 13036-1 (2011). *Características superficiais de pavimentos de estradas e de aeroportos; Métodos de ensaio; Parte 1: Medição da profundidade da macrotextura da superfície do pavimento através da técnica volumétrica da mancha*, Norma Portuguesa. Instituto Português da Qualidade (IPQ). Caparica.
- NP EN 13108-1 (2011). *Misturas betuminosas; Especificações dos materiais; Parte 1: Betão betuminoso*, Norma Portuguesa. Instituto Português da Qualidade (IPQ). Caparica.
- NP EN 13242 (2002). *Agregados para materiais não ligados ou tratados com ligantes hidráulicos utilizados em trabalhos de engenharia civil e na construção rodoviária*, Norma Portuguesa. Instituto Português da Qualidade (IPQ). Caparica.
- NP EN 13924 (2011). *Betumes e ligantes betuminosos; Especificações para betumes duros de pavimentação*, Norma Portuguesa. Instituto Português da Qualidade (IPQ). Caparica.
- NP EN 14023 (2013). *Betumes e ligantes betuminosos; Quadro de especificações de betumes modificados com polímeros*, Norma Portuguesa. Instituto Português da Qualidade (IPQ). Caparica.
- NP EN 14227-10 (2013). *Misturas tratadas com ligantes hidráulicos; Especificações; Parte 10: Solo tratado com cimento*, Norma Portuguesa. Instituto Português da Qualidade (IPQ). Caparica.
- NP EN 14227-11 (2013). *Misturas tratadas com ligantes hidráulicos; Especificações; Parte 11: Solo tratado com cal*, Norma Portuguesa. Instituto Português da Qualidade (IPQ). Caparica.
- NP EN ISO 13473-1 (2011). *Caracterização da textura do pavimento a partir de perfis da superfície; Parte 1: Determinação da profundidade média do perfil (ISO 13473-1:1997)*, Norma Portuguesa. Instituto Português da Qualidade (IPQ). Caparica.
- Nunn, M.E., Potter, J.F. (1993). Assessment of methods to prevent reflection cracking, *2nd International RILEM Conference on "Reflective Cracking in Pavements - State of the Art and Design Recommendations"*, Liege.
- Oliveira, J. (2006). *Grouted Macadam – Material Characterisation for Pavement Design.*, Doctoral Thesis, University of Nottingham, Nottingham.

- Oliveira, J.R.M., Abreu, L.P.F., Silva, H.M.R.D., Pereira, P.A.A. (2014). *Tecnologias para a produção de misturas betuminosas temperadas – Estudo da expansão do betume-espuma*, 7 ° Congresso Luso-Moçambicano de Engenharia.
- Oliveira, J.R.M., Pereira, P.A.A., Picado-Santos, L.G. (2007). *Rehabilitation Study of a Heavily Trafficked Urban Road, Mairepav5* – 5th International Conference on Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Control, Park City, Utah, USA.
- Overby, C., Johansen, R., Mataka, M. (2004). *Bitumen foaming: an innovative technique used on a large scale for pavement rehabilitation in Africa. Case study: Same-Himo monitored pilot project*, 8th Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa (CAPSA'04), Sun City, South Africa.
- Pais, J.C. (2014). *Manual do Programa JPav (versão 2.4)*, Universidade do Minho.
- Park, K., Hwang, Y., Seo, S., Seo, H. (2003). Quantitative Assessment of Environmental Impacts on Life Cycle of Highways, *Journal of Construction Engineering and Management*, Vol. 129(1), pp. 25-31.
- PCA (1984). *Thickness Design for Concrete Highways and Street Pavements.*, Portland Cement Association (PCA). Skokie-Illinois.
- Pomerantz, M., Akbari, H. (1998). *Cooler Paving Materials for the Heat Island Mitigation*, The 1998 ACEEE Summer Study on Energy Efficiency, Washington, DC.
- Pomerantz, M., Akbari, H., Chen, A., Taha, H., Rosenfeld, A.H. (1997). *Paving Materials for Heat Island Mitigation*, Berkeley, CA: Lawrence Berkeley National Laboratory.
- Pomerantz, M., Pon, B., Akbari, H., Change, S.C. (2000). *The Effect of Pavements' Temperatures on Air Temperatures in Large Cities*, Heat Island Group, LBNL-43442, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley.
- PRé-Consultants (2010). *Introduction to LCA with SimaPro 7*, Product Ecology Consultants, The Netherlands.
- Qian, C., Fan, X.J., Fan, J.J., Yuan, C.A., Zhang, G.Q. (2016). An accelerated test method of luminous flux depreciation for LED luminaires and lamps, *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 147, pp. 84-92.
- Qian, S.Z., Li, V.C., Zhang, H., Keoleian, G.A. (2013). Life cycle analysis of pavement overlays made with Engineered Cementitious Composites, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 35 (1), pp. 78-88.
- R Development Core Team (2011). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*, the R Foundation for Statistical Computing, disponível online em <http://www.r-project.org/>, Vienna, Austria.
- Rodrigues, C. (2013). *Modelos de previsão da degradação de pavimentos: parâmetro IRI*, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.

- Ross, F.R. (1982). Effect of pavement roughness on vehicle fuel consumption, *Transportation Research Record 846*, pp. 1-6.
- Roudebush, W.H. (1999). *Environmental value engineering assessment of concrete and asphalt pavement*, Portland Cement Association, PCA R&D Serial No. 2088a: Skokie, IL.
- Sánchez, J.A.S. (2006). “Vida útil”. *Necesidad de rehabilitación con soluciones innovadoras*, Centro Politécnico Superior, Zaragoza, Spain.
- Sandberg, U. (1990). *Road macro- and megatexture influence on fuel consumption*, In Meyer, W. and Reichert, J. (Eds.), *Surface Characteristics of Roadways: International Research and Technologies*, ASTM STP 1031, pp. 460-479.
- Sandberg, U. (2011). *Rolling Resistance – Basic Information and State-of-the-Art on Measurement methods.*, Swedish National Road and Transport Research Institute (VTI). MIRIAM - Models for rolling resistance In Road Infrastructure Asset Management Systems.
- Sandberg, U., Ejsmont, J.A. (2002). «*Tyre/Road Noise Reference Book*», Informex, SE-59040 Kisa, Sweden.
- Sandberg, U., Ejsmont, J.A., Bergiers, A., Goubert, L., Zöller, M., Karlsson, R. (2011). *Road surface influence on tyre/road rolling resistance*, MIRIAM - Models for rolling resistance In Road Infrastructure Asset Management Systems.
- Sandberg, U., Żurek, B.Ś., Ejsmont, J.A., Ronowski, G. (2013). Tyre/road noise reduction of poroelastic road surface tested in a laboratory, *Acoustics 2013*, Victor Harbor, Australia.
- Santero, N.J., Horvath, A. (2009). Global warming potential of pavements, *Environmental Research Letters*, Vol. 4, 034011.
- Santero, N.J., Masanet, E., Horvath, A. (2011a). Life-cycle assessment of pavements Part II: Filling the research gaps, *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 55 (9–10), pp. 810-818.
- Santero, N.J., Masanet, E., Horvath, A. (2011b). Life-cycle assessment of pavements. Part I: Critical review, *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 55 (9–10), pp. 801-809.
- Santos, J., Ferreira, A., Flintsch, G. (2015). A life cycle assessment model for pavement management: road pavement construction and management in Portugal, *International Journal of Pavement Engineering*, Vol. 16 (4), pp. 315-336.
- Santos, N. (2012). *Medição Experimental do Coeficiente de Resistência ao Rolamento e do Coeficiente de Arrasto Aerodinâmico de um Veículo Automóvel de Elevada Eficiência Energética*, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Schmidt, B., Ullidtz, P. (2010). *The energy-saving road: Energy savings in road transport as a function of the functional and structural properties of roads.*, NCC Green Road, relatório técnico 01/10, Dinamarca.

- Shell (1978). *Shell pavement design manual - asphalt pavements and overlays for road traffic*, Shell International Petroleum Company Limited, London.
- Shell (1998). *BISAR 3.0 – User Manual*, Bitumen Business Group, Shell International Oil Products B.V., The Hague.
- Silva, H.M.R.D., Oliveira, J.R.M., Jesus, C.M.G. (2012). Are totally recycled hot mix asphalts a sustainable alternative for road paving?, *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 60, pp. 38-48.
- Simas, M.S.L. (2007). *Sistemas de protecção do betão face à carbonatação*, Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa.
- Smola, A., Schölkopf, B. (2004). A tutorial on support vector regression, *Statistics and Computing*, Vol. 14 (3), pp. 199-222.
- Stripple, H. (2001). *Life cycle assessment of road: a pilot study for inventory analysis*, 2^a ed. revista, Gothenburg, Sweden: Swedish National Road Administration, IVL B 1210 E.
- Taylor, G., Patten, J. (2006). *Effects of Pavement Structure on Vehicle Fuel Consumption – Phase III*, Report Number CSTT-HVC-TR068, National Research Council Canada, Ottawa, Canada.
- TRB (2006). *Tires and passenger vehicle fuel economy: informing consumers, improving performance*, Committee for the National Tire Efficiency Study, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C.
- Treloar, G.J., Love, P.E.D., Crawford, R.H. (2004). Hybrid Life-Cycle Inventory for Road Construction and Use, *Journal of Construction Engineering and Management*, Vol. 130 (1), pp. 43-49.
- Ullidtz, P., Peattie, K.R. (1982). *Programmable calculators in the assessment of overlays and maintenance strategies*, 5th International Conference on Structural Design of Asphalt Pavements, p. 671-681, Delft.
- Van Poel, C.D. (1954). A general system describing the visco-elastic properties of bitumens and its relation to routine test data, *Journal of Applied Chemistry*, Vol. 4 (5), pp. 221-236.
- Vidal, R., Moliner, E., Martínez, G., Rubio, M.C. (2013). Life cycle assessment of hot mix asphalt and zeolite-based warm mix asphalt with reclaimed asphalt pavement, *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 74 (0), pp. 101-114.
- Wang, T., Lee, I.-S., Kendall, A., Harvey, J., Lee, E.-B., Kim, C. (2012). Life cycle energy consumption and GHG emission from pavement rehabilitation with different rolling resistance, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 33, pp. 86-96.
- Watanatada, T., Dhahreshar, A., Rezende-Lima, P. (1987). *Vehicle Speeds and Operating Costs: Models for Road Planning and Management*, John Hopkins Press: Baltimore.
- Wathne, L. (2010). Sustainability Opportunities With Pavements: Are We Focusing on the Right Stuff?, *International Conference on Sustainable Concrete Pavements*, Washington DC, USA.

- WCED (1987). *Our Common Future*, Report of the World Commission on Environment and Development. United Nations. Oslo.
- White, P., Golden, J.S., Biligiri, K.P., Kaloush, K. (2010). Modeling climate change impacts of pavement production and construction, *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 54 (11), pp. 776–782.
- Willis, J.R., Robbins, M.M., Thompson, M. (2015). *Effects of pavement properties on vehicular rolling resistance: a literature review*, National Center for Asphalt Technology, Auburn University, Auburn, Alabama.
- Wirtgen (2012). *Reciclagem a frio: Tecnologia de reciclagem a frio Wirtgen*, Wirtgen GmbH, Windhagen, Alemanha.
- Wirtgen (2016a). *Mobile cold recycling mixing plant KMA 220*, <http://www.wirtgen.de/en/products/cold-recyclers-soil-stabilizers/mobile-cold-recycling-mixing-plant/kma220.php>, Wirtgen GmbH Windhagen, Germany; Acedido em 5 de fevereiro de 2016.
- Wirtgen (2016b). *The operating principle of hot recycling. A modern hot recycler – here's how it works*, http://www.wirtgen.de/en/technologies/hot-recycling/operating-principle/funktionsprinzip_1.php#langnotavail_pt, Wirtgen GmbH Windhagen, Germany; Acedido em 5 de fevereiro de 2016.
- Woodside, A., Woodward, D., McErlean, P. (2003). Rolling Resistance of Surface Materials Affected by Surface Type, Tyre Load and Inflation Pressure, *MAIREPAV'03 - Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Control - International Symposium*, Guimarães, Portugal.
- Wright, P., Paquette, R. (1987). *Highway Engineering*, John Wiley & Sons, 5th edition, New York.
- Yoder, E., Witczak, M. (1975). *Principles of pavement design*, John Wiley & Sons, New York.
- Young, J. (1988). The influence of road unevenness on vehicle fuel consumption, *16th PTRC Meeting, Seminar E*, pp. 217-27.
- Yu, B., Lu, Q. (2012). Life cycle assessment of pavement: Methodology and case study, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Vol. 17 (5), pp. 380-388.
- Zaabar, I., Chatti, K. (2010). Calibration of HDM-4 Models for Estimating the Effect of Pavement Roughness on Fuel Consumption for U. S. Conditions, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 2155, pp. 105-116.
- Zaniewski, J.P. (1989). *Effect of Pavement Surface Type on Fuel Consumption*, Portland Cement Association, PCA R&D SR289, Skokie, Illinois.
- Zapata, P., Gambatese, J.A. (2005). Energy consumption of asphalt and reinforced concrete pavement materials and construction, *Journal of Infrastructure Systems*, Vol. 11, pp. 9-20.

- Zhang, H., Lepech, M., Keoleian, G., Qian, S., Li, V. (2010). Dynamic Life-Cycle Modeling of Pavement Overlay Systems: Capturing the Impacts of Users, Construction, and Roadway Deterioration, *Journal of Infrastructure Systems*, Vol. 16 (4), pp. 299-309.
- Zhang, W., Zhang, S., Wan, C., Yue, D., Ye, Y., Wang, X. (2008). Source diagnostics of polycyclic aromatic hydrocarbons in urban road runoff, dust, rain and canopy throughfall, *Environmental Pollution*, Vol. 153 (3), pp. 594-601.

ANEXOS

Anexo A

Resultados experimentais - Média do esforço de torque e do consumo de energia obtidos em cada ciclo de ensaios com o protótipo desenvolvido

Quadro A.1 – Resultados experimentais obtidos para o esforço de torque sobre a superfície A, a 5 km/h

Carga (kN)	Ciclo 1			Ciclo 2			Torque médio 2 ciclos (N.m)
	Nº de Amostras	Torque médio (N.m)	Desvio Padrão	Nº de Amostras	Torque médio (N.m)	Desvio Padrão	
0,70	9076	1,036	0,233	5624	0,966	0,227	1,001
0,76	8174	1,168	0,243	7663	1,104	0,240	1,136
0,82	5228	1,307	0,243	5575	1,228	0,238	1,268
0,88	4943	1,472	0,245	4783	1,397	0,246	1,434
0,94	5558	1,646	0,250	3510	1,546	0,227	1,596
1,00	4824	1,828	0,244	4348	1,746	0,227	1,787

Quadro A.2 – Resultados experimentais obtidos para o consumo de energia sobre a superfície A, a 5 km/h

Carga (kN)	Ciclo 1			Ciclo 2			Energia média 2 ciclos (J/s)
	Nº de Amostras	Energia média (J/s)	Desvio Padrão	Nº de Amostras	Energia média (J/s)	Desvio Padrão	
0,70	1509	3,401	1,223	929	3,465	1,275	3,433
0,76	1369	3,586	1,251	1279	3,660	1,319	3,623
0,82	879	3,778	1,345	939	3,836	1,385	3,807
0,88	829	4,004	1,384	799	4,066	1,491	4,035
0,94	929	4,243	1,477	589	4,320	1,581	4,281
1,00	809	4,483	1,646	729	4,585	1,470	4,534

Quadro A.3 – Resultados experimentais obtidos para o esforço de torque sobre a superfície A, a 10 km/h

Carga (kN)	Ciclo 1			Ciclo 2			Torque médio 2 ciclos (N.m)
	Nº de Amostras	Torque médio (N.m)	Desvio Padrão	Nº de Amostras	Torque médio (N.m)	Desvio Padrão	
0,70	9193	1,501	0,070	7756	1,197	0,068	1,349
0,76	6830	1,700	0,061	5129	1,360	0,074	1,530
0,82	6862	1,918	0,073	4471	1,533	0,058	1,726
0,88	5023	2,176	0,073	5044	1,695	0,072	1,935
0,94	4970	2,435	0,068	4986	1,915	0,072	2,175
1,00	4828	2,693	0,070	5102	2,158	0,068	2,425

Quadro A.4 – Resultados experimentais obtidos para o consumo de energia sobre a superfície A, a 10 km/h

Carga (kN)	Ciclo 1			Ciclo 2			Energia média 2 ciclos (J/s)
	Nº de Amostras	Energia média (J/s)	Desvio Padrão	Nº de Amostras	Energia média (J/s)	Desvio Padrão	
0,70	1528	6,192	2,290	1289	5,506	1,966	5,849
0,76	1139	6,682	2,438	859	5,892	2,033	6,287
0,82	1149	7,246	2,511	749	6,278	2,185	6,762
0,88	839	7,819	2,870	849	6,677	2,437	7,248
0,94	829	8,366	2,893	839	7,216	2,559	7,791
1,00	809	8,922	3,186	859	7,758	2,797	8,340

Quadro A.5 – Resultados experimentais obtidos para o esforço de torque sobre a superfície A, a 15 km/h

Carga (kN)	Ciclo 1			Ciclo 2			Torque médio 2 ciclos (N.m)
	Nº de Amostras	Torque médio (N.m)	Desvio Padrão	Nº de Amostras	Torque médio (N.m)	Desvio Padrão	
0,70	7797	1,656	0,066	9411	1,335	0,084	1,495
0,76	4747	1,880	0,059	6821	1,548	0,077	1,714
0,82	4915	2,145	0,050	6492	1,795	0,074	1,970
0,88	4928	2,483	0,052	5006	2,095	0,087	2,289
0,94	5095	2,871	0,057	5499	2,448	0,077	2,659
1,00	4471	3,376	0,059	4727	2,913	0,085	3,145

Quadro A.6 – Resultados experimentais obtidos para o consumo de energia sobre a superfície A, a 15 km/h

Carga (kN)	Ciclo 1			Ciclo 2			Energia média 2 ciclos (J/s)
	Nº de Amostras	Energia média (J/s)	Desvio Padrão	Nº de Amostras	Energia média (J/s)	Desvio Padrão	
0,70	1289	8,900	3,294	1589	7,779	0,898	8,340
0,76	799	9,699	3,410	1149	8,561	1,004	9,130
0,82	819	10,541	3,699	1089	9,447	1,057	9,994
0,88	829	11,577	4,050	849	10,431	1,157	11,004
0,94	849	12,657	4,439	929	11,517	1,179	12,087
1,00	749	13,922	4,962	799	12,856	1,277	13,389

Quadro A.7 – Resultados experimentais obtidos para o esforço de torque sobre a superfície A, a 20 km/h

Carga (kN)	Ciclo 1			Ciclo 2			Torque médio 2 ciclos (N.m)
	Nº de Amostras	Torque médio (N.m)	Desvio Padrão	Nº de Amostras	Torque médio (N.m)	Desvio Padrão	
0,70	9301	1,918	0,069	9402	1,540	0,095	1,729
0,76	6629	2,279	0,042	6563	1,868	0,074	2,073
0,82	6664	2,746	0,045	7192	2,297	0,088	2,521
0,88	4697	2,881	0,048	5247	2,881	0,079	2,881
0,94	4945	3,623	0,059	5201	3,633	0,080	3,628
1,00	4887	4,357	0,063	5290	4,677	0,076	4,517

Quadro A.8 – Resultados experimentais obtidos para o consumo de energia sobre a superfície A, a 20 km/h

Carga (kN)	Ciclo 1			Ciclo 2			Energia média 2 ciclos (J/s)
	Nº de Amostras	Energia média (J/s)	Desvio Padrão	Nº de Amostras	Energia média (J/s)	Desvio Padrão	
0,70	1559	12,123	4,497	1569	10,539	1,250	11,331
0,76	1108	13,531	4,824	1109	11,914	1,171	12,722
0,82	1108	15,292	5,367	1209	13,603	1,109	14,448
0,88	789	15,863	5,719	889	15,759	1,053	15,811
0,94	829	18,271	6,526	879	18,311	1,005	18,291
1,00	819	20,457	7,217	899	20,869	0,941	20,663

Quadro A.9 – Resultados experimentais obtidos para o esforço de torque sobre a superfície B, a 5 km/h

Carga (kN)	Ciclo 1			Ciclo 2			Torque médio 2 ciclos (N.m)
	Nº de Amostras	Torque médio (N.m)	Desvio Padrão	Nº de Amostras	Torque médio (N.m)	Desvio Padrão	
0,70	9396	0,874	0,230	9227	0,818	0,268	0,846
0,76	6493	0,969	0,228	8028	0,928	0,258	0,948
0,82	6465	1,111	0,233	5384	1,051	0,254	1,081
0,88	5070	1,228	0,248	4950	1,171	0,249	1,200
0,94	5129	1,286	0,259	4502	1,384	0,238	1,335
1,00	3897	1,479	0,257	5093	1,491	0,241	1,485

Quadro A.10 – Resultados experimentais obtidos para o consumo de energia sobre a superfície B, a 5 km/h

Carga (kN)	Ciclo 1			Ciclo 2			Energia média 2 ciclos (J/s)
	Nº de Amostras	Energia média (J/s)	Desvio Padrão	Nº de Amostras	Energia média (J/s)	Desvio Padrão	
0,70	1559	3,354	1,249	1529	3,258	1,545	3,306
0,76	1088	3,482	1,306	1339	3,418	1,439	3,450
0,82	1079	3,679	1,274	899	3,581	1,315	3,630
0,88	849	3,844	1,399	829	3,756	1,318	3,800
0,94	879	3,925	1,432	759	3,969	1,263	3,947
1,00	659	4,194	1,484	844	4,208	1,181	4,201

Quadro A.11 – Resultados experimentais obtidos para o esforço de torque sobre a superfície B, a 10 km/h

Carga (kN)	Ciclo 1			Ciclo 2			Torque médio 2 ciclos (N.m)
	Nº de Amostras	Torque médio (N.m)	Desvio Padrão	Nº de Amostras	Torque médio (N.m)	Desvio Padrão	
0,70	9189	0,989	0,054	7124	0,975	0,088	0,982
0,76	6394	1,084	0,064	4924	1,096	0,070	1,090
0,82	6909	1,200	0,061	5810	1,258	0,067	1,229
0,88	4649	1,404	0,076	4018	1,477	0,072	1,440
0,94	5175	1,642	0,071	4713	1,684	0,067	1,663
1,00	5033	1,792	0,099	3705	1,898	0,050	1,845

Quadro A.12 – Resultados experimentais obtidos para o consumo de energia sobre a superfície B, a 10 km/h

Carga (kN)	Ciclo 1			Ciclo 2			Energia média 2 ciclos (J/s)
	Nº de Amostras	Energia média (J/s)	Desvio Padrão	Nº de Amostras	Energia média (J/s)	Desvio Padrão	
0,70	1529	5,086	1,890	1179	4,987	2,719	5,037
0,76	1069	5,328	1,911	829	5,332	2,389	5,330
0,82	1159	5,634	2,001	968	5,779	2,248	5,706
0,88	779	6,105	2,143	669	6,288	2,092	6,196
0,94	869	6,684	2,319	789	6,820	1,937	6,752
1,00	839	7,049	2,583	629	7,366	1,794	7,207

Quadro A.13 – Resultados experimentais obtidos para o esforço de torque sobre a superfície B, a 15 km/h

Carga (kN)	Ciclo 1			Ciclo 2			Torque médio 2 ciclos (N.m)
	Nº de Amostras	Torque médio (N.m)	Desvio Padrão	Nº de Amostras	Torque médio (N.m)	Desvio Padrão	
0,70	6947	1,142	0,049	3758	1,129	0,044	1,136
0,76	4812	1,320	0,050	1813	1,299	0,102	1,309
0,82	5233	1,505	0,034	5735	1,525	0,045	1,515
0,88	4339	1,721	0,046	5332	1,772	0,029	1,747
0,94	5164	1,993	0,058	4939	2,268	0,053	2,131
1,00	4682	2,373	0,050	4251	2,525	0,045	2,449

Quadro A.14 – Resultados experimentais obtidos para o consumo de energia sobre a superfície B, a 15 km/h

Carga (kN)	Ciclo 1			Ciclo 2			Energia média 2 ciclos (J/s)
	Nº de Amostras	Energia média (J/s)	Desvio Padrão	Nº de Amostras	Energia média (J/s)	Desvio Padrão	
0,70	1149	7,228	2,599	619	7,094	4,178	7,161
0,76	809	7,878	2,755	299	7,746	3,049	7,812
0,82	879	8,459	2,981	959	8,526	2,619	8,493
0,88	729	9,226	3,330	889	9,411	2,367	9,319
0,94	869	10,132	3,607	829	10,607	2,223	10,370
1,00	789	11,325	4,025	719	11,828	2,024	11,576

Quadro A.15 – Resultados experimentais obtidos para o esforço de torque sobre a superfície B, a 20 km/h

Carga (kN)	Ciclo 1			Ciclo 2			Torque médio 2 ciclos (N.m)
	Nº de Amostras	Torque médio (N.m)	Desvio Padrão	Nº de Amostras	Torque médio (N.m)	Desvio Padrão	
0,70	3909	1,428	0,064	3546	1,434	0,059	1,431
0,76	5810	1,673	0,040	5232	1,687	0,055	1,680
0,82	1529	1,936	0,079	4069	2,114	0,046	2,025
0,88	4106	2,485	0,058	5143	2,679	0,050	2,582
0,94	5244	3,162	0,087	5606	3,366	0,031	3,264
1,00	4575	3,893	0,145	5131	4,163	0,035	4,028

Quadro A.16 – Resultados experimentais obtidos para o consumo de energia sobre a superfície B, a 20 km/h

Carga (kN)	Ciclo 1			Ciclo 2			Energia média 2 ciclos (J/s)
	Nº de Amostras	Energia média (J/s)	Desvio Padrão	Nº de Amostras	Energia média (J/s)	Desvio Padrão	
0,70	78	10,130	4,123	599	9,963	5,557	10,047
0,76	969	11,276	3,956	879	11,145	5,004	11,211
0,82	459	12,284	3,768	679	12,752	4,288	12,518
0,88	689	14,531	4,123	859	15,065	3,570	14,798
0,94	879	16,861	4,829	939	17,497	3,230	17,179
1,00	769	19,050	5,547	859	19,642	2,890	19,346

Quadro A.17 – Resultados experimentais obtidos para o esforço de torque sobre a superfície C, a 5 km/h

Carga (kN)	Ciclo 1			Ciclo 2			Torque médio 2 ciclos (N.m)
	Nº de Amostras	Torque médio (N.m)	Desvio Padrão	Nº de Amostras	Torque médio (N.m)	Desvio Padrão	
0,70	3351	0,959	0,228	3765	0,934	0,241	0,946
0,76	3266	1,086	0,237	1054	1,027	0,237	1,056
0,82	1753	1,217	0,236	3287	1,146	0,248	1,181
0,88	3322	1,366	0,250	3868	1,264	0,241	1,315
0,94	2478	1,534	0,250	2889	1,418	0,244	1,476
1,00	3397	1,702	0,243	1960	1,587	0,239	1,644

Quadro A.18 – Resultados experimentais obtidos para o consumo de energia sobre a superfície C, a 5 km/h

Carga (kN)	Ciclo 1			Ciclo 2			Energia média 2 ciclos (J/s)
	Nº de Amostras	Energia média (J/s)	Desvio Padrão	Nº de Amostras	Energia média (J/s)	Desvio Padrão	
0,70	136	3,502	1,104	629	3,382	1,022	3,442
0,76	549	3,614	1,094	169	3,559	1,147	3,587
0,82	649	3,825	1,178	549	3,734	1,165	3,780
0,88	559	4,030	1,174	649	3,917	1,235	3,973
0,94	419	4,255	1,254	489	4,143	1,256	4,199
1,00	569	4,478	1,274	339	4,371	1,345	4,425

Quadro A.19 – Resultados experimentais obtidos para o esforço de torque sobre a superfície C, a 10 km/h

Carga (kN)	Ciclo 1			Ciclo 2			Torque médio 2 ciclos (N.m)
	Nº de Amostras	Torque médio (N.m)	Desvio Padrão	Nº de Amostras	Torque médio (N.m)	Desvio Padrão	
0,70	3568	1,117	0,084	1238	1,016	0,075	1,066
0,76	2653	1,229	0,071	2274	1,166	0,091	1,197
0,82	2726	1,420	0,091	3311	1,353	0,076	1,386
0,88	2417	1,619	0,080	2033	1,553	0,088	1,586
0,94	3997	1,803	0,081	3287	1,841	0,067	1,822
1,00	2890	2,027	0,077	2753	2,019	0,066	2,023

Quadro A.20 – Resultados experimentais obtidos para o consumo de energia sobre a superfície C, a 10 km/h

Carga (kN)	Ciclo 1			Ciclo 2			Energia média 2 ciclos (J/s)
	Nº de Amostras	Energia média (J/s)	Desvio Padrão	Nº de Amostras	Energia média (J/s)	Desvio Padrão	
0,70	589	5,374	1,521	209	5,116	2,127	5,245
0,76	449	5,709	1,681	379	5,480	1,979	5,594
0,82	459	6,129	1,860	559	5,921	1,896	6,025
0,88	409	6,586	1,889	339	6,401	1,786	6,493
0,94	669	7,054	2,144	549	6,955	1,569	7,005
1,00	489	7,559	2,192	469	7,500	1,514	7,529

Quadro A.21 – Resultados experimentais obtidos para o esforço de torque sobre a superfície C, a 15 km/h

Carga (kN)	Ciclo 1			Ciclo 2			Torque médio 2 ciclos (N.m)
	Nº de Amostras	Torque médio (N.m)	Desvio Padrão	Nº de Amostras	Torque médio (N.m)	Desvio Padrão	
0,70	1179	1,225	0,030	1130	1,207	0,047	1,216
0,76	2029	1,484	0,060	2056	1,443	0,053	1,463
0,82	2375	1,729	0,057	1676	1,669	0,053	1,699
0,88	2242	2,026	0,077	1436	1,965	0,054	1,995
0,94	2460	2,365	0,045	2367	2,283	0,069	2,324
1,00	2232	2,779	0,054	2182	2,622	0,053	2,700

Quadro A.22 – Resultados experimentais obtidos para o consumo de energia sobre a superfície C, a 15 km/h

Carga (kN)	Ciclo 1			Ciclo 2			Energia média 2 ciclos (J/s)
	Nº de Amostras	Energia média (J/s)	Desvio Padrão	Nº de Amostras	Energia média (J/s)	Desvio Padrão	
0,70	199	7,519	2,185	189	7,329	3,453	7,424
0,76	339	8,307	2,293	349	8,107	3,132	8,207
0,82	399	9,142	2,613	279	8,939	2,945	9,041
0,88	379	10,135	2,818	239	9,892	2,541	10,013
0,94	419	11,242	3,222	399	10,939	2,352	11,090
1,00	379	12,472	3,565	369	12,068	2,122	12,270

Quadro A.23 – Resultados experimentais obtidos para o esforço de torque sobre a superfície D, a 5 km/h

Carga (kN)	Ciclo 1			Ciclo 2			Torque médio 2 ciclos (N.m)
	Nº de Amostras	Torque médio (N.m)	Desvio Padrão	Nº de Amostras	Torque médio (N.m)	Desvio Padrão	
0,70	3399	0,754	0,239	3722	0,768	0,241	0,761
0,76	2653	0,804	0,242	1923	0,839	0,247	0,821
0,82	2679	0,906	0,238	2896	0,925	0,243	0,915
0,88	2040	1,012	0,240	2232	1,012	0,245	1,012
0,94	2683	1,142	0,252	3505	1,147	0,258	1,145
1,00	2614	1,259	0,239	3703	1,275	0,251	1,267

Quadro A.24 – Resultados experimentais obtidos para o consumo de energia sobre a superfície D, a 5 km/h

Carga (kN)	Ciclo 1			Ciclo 2			Energia média 2 ciclos (J/s)
	Nº de Amostras	Energia média (J/s)	Desvio Padrão	Nº de Amostras	Energia média (J/s)	Desvio Padrão	
0,70	569	3,111	1,163	639	3,155	1,197	3,133
0,76	439	3,210	1,093	329	3,262	1,246	3,236
0,82	449	3,354	1,104	489	3,379	1,179	3,367
0,88	349	3,519	1,139	378	3,500	1,215	3,509
0,94	449	3,686	1,261	589	3,688	1,167	3,687
1,00	439	3,881	1,170	629	3,877	1,167	3,879

Quadro A.25 – Resultados experimentais obtidos para o esforço de torque sobre a superfície D, a 10 km/h

Carga (kN)	Ciclo 1			Ciclo 2			Torque médio 2 ciclos (N.m)
	Nº de Amostras	Torque médio (N.m)	Desvio Padrão	Nº de Amostras	Torque médio (N.m)	Desvio Padrão	
0,70	4401	0,875	0,077	4432	0,882	0,076	0,879
0,76	2418	0,966	0,064	2778	0,977	0,062	0,971
0,82	2687	1,089	0,073	2043	1,115	0,069	1,102
0,88	2307	1,219	0,068	2659	1,254	0,077	1,237
0,94	3247	1,389	0,088	3690	1,430	0,087	1,410
1,00	3079	1,562	0,079	2331	1,606	0,068	1,584

Quadro A.26 – Resultados experimentais obtidos para o consumo de energia sobre a superfície D, a 10 km/h

Carga (kN)	Ciclo 1			Ciclo 2			Energia média 2 ciclos (J/s)
	Nº de Amostras	Energia média (J/s)	Desvio Padrão	Nº de Amostras	Energia média (J/s)	Desvio Padrão	
0,70	729	4,749	1,364	739	4,739	1,349	4,744
0,76	409	4,972	1,464	469	5,012	1,475	4,992
0,82	449	5,289	1,620	349	5,311	1,488	5,300
0,88	389	5,630	1,654	449	5,681	1,602	5,655
0,94	549	6,005	1,694	619	6,055	1,835	6,030
1,00	519	6,418	1,874	389	6,482	1,876	6,450

Quadro A.27 – Resultados experimentais obtidos para o esforço de torque sobre a superfície D, a 15 km/h

Carga (kN)	Ciclo 1			Ciclo 2			Torque médio 2 ciclos (N.m)
	Nº de Amostras	Torque médio (N.m)	Desvio Padrão	Nº de Amostras	Torque médio (N.m)	Desvio Padrão	
0,70	2854	0,989	0,035	3001	1,018	0,036	1,004
0,76	2688	1,131	0,053	2512	1,183	0,036	1,157
0,82	2294	1,321	0,076	2594	1,397	0,053	1,359
0,88	1554	1,678	0,067	2065	1,643	0,055	1,660
0,94	1772	1,875	0,091	1848	1,916	0,055	1,896
1,00	1475	2,161	0,054	1962	2,237	0,077	2,199

Quadro A.28 – Resultados experimentais obtidos para o consumo de energia sobre a superfície D, a 15 km/h

Carga (kN)	Ciclo 1			Ciclo 2			Energia média 2 ciclos (J/s)
	Nº de Amostras	Energia média (J/s)	Desvio Padrão	Nº de Amostras	Energia média (J/s)	Desvio Padrão	
0,70	479	6,520	1,839	509	6,634	1,880	6,577
0,76	449	7,058	2,057	419	7,217	2,024	7,138
0,82	388	7,753	2,211	439	7,944	2,235	7,849
0,88	249	8,633	2,496	349	8,802	2,458	8,717
0,94	299	9,532	2,726	319	9,724	2,860	9,628
1,00	249	10,554	3,162	329	10,734	2,951	10,644

Anexo B

Resultados detalhados da análise da sustentabilidade de diferentes estruturas de pavimentos, apresentada no Capítulo 8

Quadro B.1 – Recursos materiais utilizados na construção dos pavimentos

Pavimento		Mat. Gran. (ton/km)	Agregados (ton/km)	Betume (ton/km)
Convencional	Estrutura 1	5440,5	4018,5	211,5
	Estrutura 2	5265,0	4084,2	216,9
	Estrutura 3	5265,0	4014,1	215,9
Perpétuo	Estrutura 1	5265,0	5023,1	264,4
	Estrutura 2	5265,0	5224,1	275,0
	Estrutura 3	5265,0	5018,7	268,8

Quadro B.2 – Consumo de energia e emissões resultantes da construção dos pavimentos

Pavimento		Consumo de energia (MJ/km)	Emissões (ton/km)		
			CO ₂ -eq	SO ₂	NO _x
Convencional	Estrutura 1	1,15E+02	1,15E+02	2,07E-01	5,82E-01
	Estrutura 2	1,17E+02	1,17E+02	2,11E-01	5,91E-01
	Estrutura 3	1,16E+02	1,15E+02	2,10E-01	5,85E-01
Perpétuo	Estrutura 1	1,41E+02	1,40E+02	2,57E-01	7,03E-01
	Estrutura 2	1,46E+02	1,45E+02	2,67E-01	7,27E-01
	Estrutura 3	1,41E+02	1,41E+02	2,59E-01	7,07E-01

Quadro B.3 – Recursos materiais utilizados nas operações de conservação

Pavimento	Cenário	Agregados (ton/km)	Betume (ton/km)	RAP (ton/km)
Estrutura 1	1	4661,5	245,3	3553,2
	2	6027,8	317,3	2961,0
	3	4982,9	262,3	3214,8
	4	2893,3	152,3	338,4
Estrutura 2	1	4619,0	246,6	3736,6
	2	5519,7	299,2	2996,6
	3	4918,1	265,8	2926,0
	4	2406,5	133,6	282,2
Estrutura 3	1	4492,7	244,9	3722,4
	2	5204,1	294,9	2961,0
	3	4665,6	262,4	2897,6
	4	2154,0	130,2	253,8

Quadro B.4 – Consumo de energia e emissões resultantes das operações de conservação

Estrutura	Cenário	Consumo de energia (MJ/km)	Emissões (ton/km)		
			CO ₂ -eq	SO ₂	NO _x
1	1	3,33E+06	1,67E+02	2,90E-01	8,25E-01
	2	3,75E+06	1,97E+02	3,51E-01	9,80E-01
	3	3,53E+06	1,85E+02	3,10E-01	9,54E-01
	4	1,44E+06	8,20E+01	1,53E-01	4,18E-01
2	1	3,38E+06	1,69E+02	2,93E-01	8,37E-01
	2	3,56E+06	1,86E+02	3,32E-01	9,35E-01
	3	3,34E+06	1,76E+02	3,05E-01	9,05E-01
	4	1,22E+06	7,07E+01	1,33E-01	3,67E-01
3	1	3,32E+06	1,67E+02	2,90E-01	8,23E-01
	2	3,41E+06	1,80E+02	3,23E-01	9,00E-01
	3	3,22E+06	1,71E+02	2,98E-01	8,77E-01
	4	1,10E+06	6,52E+01	1,25E-01	3,39E-01

Quadro B.5 – Recursos materiais utilizados nas operações de construção e conservação

Pavimento	Cenário	Agregados (ton/km)	Betume (ton/km)	RAP (ton/km)
Estrutura 1	1	8680,0	456,8	3553,2
	2	10.046,3	528,8	2961,0
	3	9001,4	473,8	3214,8
	4	7916,4	416,7	338,4
Estrutura 2	1	8703,2	463,5	3736,6
	2	9604,0	516,1	2996,6
	3	9002,3	482,7	2926,0
	4	7630,6	408,6	282,2
Estrutura 3	1	8506,8	460,8	3722,4
	2	9218,1	510,9	2961,0
	3	8679,6	478,3	2897,6
	4	7172,7	399,0	253,8

Quadro B.6 – Consumo de energia e emissões resultantes das operações de construção e conservação

Estrutura	Cenário	Consumo de energia (MJ/km)	Emissões (ton/km)		
			CO ₂ -eq	SO ₂	NO _x
1	1	5,25E+06	2,82E+02	4,97E-01	1,41E+00
	2	5,67E+06	3,12E+02	5,58E-01	1,56E+00
	3	5,45E+06	3,00E+02	5,17E-01	1,54E+00
	4	3,80E+06	2,22E+02	4,10E-01	1,12E+00
2	1	5,33E+06	2,86E+02	5,05E-01	1,43E+00
	2	5,51E+06	3,03E+02	5,44E-01	1,53E+00
	3	5,29E+06	2,94E+02	5,16E-01	1,50E+00
	4	3,67E+06	2,16E+02	3,99E-01	1,09E+00
3	1	5,23E+06	2,82E+02	4,99E-01	1,41E+00
	2	5,32E+06	2,95E+02	5,33E-01	1,48E+00
	3	5,14E+06	2,87E+02	5,07E-01	1,46E+00
	4	3,46E+06	2,07E+02	3,85E-01	1,05E+00

Quadro B.7 – Consumos e emissões resultantes da utilização da estrada

Estrutura	Cenário	Consumo combustível (l/km)	Consumo de energia (MJ/km)	Emissões (ton/km)		
				CO ₂ -eq	SO ₂	NO _x
1	1	9,46E+07	3,31E+09	2,20E+05	1,09E+02	1,19E+03
	2	9,09E+07	3,18E+09	2,13E+05	1,01E+02	1,11E+03
	3	9,13E+07	3,20E+09	2,14E+05	1,01E+02	1,11E+03
	4	9,07E+07	3,18E+09	2,13E+05	1,00E+02	1,10E+03
2	1	9,71E+07	3,40E+09	2,26E+05	1,11E+02	1,22E+03
	2	9,33E+07	3,27E+09	2,19E+05	1,03E+02	1,13E+03
	3	9,35E+07	3,27E+09	2,19E+05	1,04E+02	1,14E+03
	4	9,31E+07	3,26E+09	2,18E+05	1,03E+02	1,13E+03
3	1	9,57E+07	3,35E+09	2,23E+05	1,10E+02	1,20E+03
	2	9,20E+07	3,22E+09	2,16E+05	1,02E+02	1,12E+03
	3	9,23E+07	3,23E+09	2,16E+05	1,02E+02	1,12E+03
	4	9,18E+07	3,21E+09	2,15E+05	1,01E+02	1,11E+03

Quadro B.8 – Consumo de energia e emissões totais previstos para o período de análise do ciclo de vida

Estrutura	Cenário	Consumo de energia (MJ/km)	Emissões (ton/km)		
			CO ₂ -eq	SO ₂	NO _x
1	1	3,32E+09	2,20E+05	1,09E+02	1,19E+03
	2	3,19E+09	2,13E+05	1,01E+02	1,11E+03
	3	3,20E+09	2,14E+05	1,02E+02	1,11E+03
	4	3,18E+09	2,13E+05	1,01E+02	1,10E+03
2	1	3,40E+09	2,26E+05	1,12E+02	1,22E+03
	2	3,27E+09	2,19E+05	1,04E+02	1,14E+03
	3	3,28E+09	2,20E+05	1,04E+02	1,14E+03
	4	3,26E+09	2,19E+05	1,03E+02	1,13E+03
3	1	3,36E+09	2,23E+05	1,10E+02	1,21E+03
	2	3,23E+09	2,16E+05	1,02E+02	1,12E+03
	3	3,23E+09	2,16E+05	1,03E+02	1,12E+03
	4	3,22E+09	2,16E+05	1,02E+02	1,11E+03

Quadro B.9 – Estimativa dos custos das operações de construção e conservação

Estrutura	Cenário	Custos construção (€/km)	Custos conservação (€/km)	Custos totais (€/km)
1	1	298.260,00	586.800,00	885.060,00
	2	298.260,00	711.018,00	1.009.278,00
	3	298.260,00	722.700,00	1.020.960,00
	4	345.150,00	309.600,00	654.750,00
2	1	316.350,00	638.820,00	955.170,00
	2	316.350,00	782.460,00	1.098.810,00
	3	316.350,00	747.720,00	1.064.070,00
	4	365.850,00	352.800,00	718.650,00
3	1	296.550,00	601.200,00	897.750,00
	2	296.550,00	679.140,00	975.690,00
	3	296.550,00	666.720,00	963.270,00
	4	346.050,00	253.800,00	599.850,00

Quadro B.10 – Estimativa dos custos globais imputáveis a cada estrutura e cenário em estudo

Estrutura	Cenário	Custos globais (€/km)
1	1	117.825.864,86
	2	113.416.246,63
	3	113.930.679,04
	4	112.796.057,42
2	1	120.971.518,03
	2	116.462.081,91
	3	116.707.254,85
	4	115.809.273,81
3	1	119.253.538,60
	2	114.742.782,95
	3	115.006.402,99
	4	114.098.067,24