

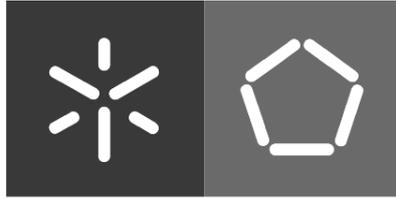
**Universidade do Minho**  
Escola de Engenharia

Ariana Filipa Rego Biscaia

**Avaliação da sustentabilidade de materiais de  
pavimentação ao longo do seu ciclo de vida**

Novembro de 2014





**Universidade do Minho**  
Escola de Engenharia

Ariana Filipa Rego Biscaia

**Avaliação da sustentabilidade de materiais de  
pavimentação ao longo do seu ciclo de vida**

Dissertação de Mestrado  
Mestrado Integrado em Engenharia Civil

Trabalho efetuado sob a orientação de  
Professor Doutor Joel Ricardo Martins Oliveira  
Professor Doutor Hugo Manuel Ribeiro Dias da Silva

Novembro de 2014



## **AGRADECIMENTOS**

A realização deste trabalho deve-se ao suporte e disponibilização de um conjunto de entidades e pessoas a quem gostaria de expressar os meus sinceros agradecimentos.

À Universidade do Minho e em especial ao Grupo de Vias de Comunicação da Área Disciplinar de Transportes e Geotecnia, do Departamento de Engenharia Civil, pelas condições disponibilizadas e pela contribuição na minha formação como ser humano e como Engenheira.

Ao Professor Doutor Joel Oliveira e Professor Doutor Hugo Silva, quero expressar o meu agradecimento pela disponibilidade e apoio, pela simpatia, pelos ensinamentos transmitidos, e pela orientação que se revelaram indispensáveis para a realização deste trabalho.

Ao João Paulo, pela cooperação, apreciação e tempo dispensados e me aconselhar sobre alguns aspetos importantes acerca deste estudo.

Ao Engenheiro Carlos Palha pela dedicação e pela paciência, pela disponibilidade, pela troca de ideias e por todo o conhecimento transmitido não só a nível laboratorial mas de engenharia em geral.

Ao meu amigo Hélder Torres, técnico do Laboratório de Vias de Comunicação, pelo apoio, ensinamentos e opiniões transmitidos, pela troca de ideias ao longo deste percurso académico, pela motivação e sobretudo pela amizade e companheirismo.

Aos meus colegas e amigos de curso e do laboratório pela amizade, companheirismo e espírito de entreajuda ao longo destes anos e nesta etapa crucial, em especial à Cátia, à Vera, à Andreia, à Sara, à Márcia, ao Francisco e ao Bruno, pelas excelentes pessoas que são, por me ensinarem que a amizade é sólida em todas as circunstâncias que todos juntos partilhamos e mesmo que a distância seja algum dia maior este espírito de grupo permanecerá. Com eles, eu cresci.

À Catarina, incansável amiga que desde o primeiro dia nesta academia sempre me acompanhou e partilhou as alegrias e as tristezas nos bons, nos ótimos e nos maus momentos. A ela um profundo agradecimento por ter sido um dos meus pilares neste percurso, pela amizade e paciência e por ser o meu braço direito, e o meu braço esquerdo quando é necessário.

Ao David e seus nomes próprios, que desde há um ano que esta amizade engrandece e assim espero que continue por muitos mais.

Aos meus amigos conterrâneos e em especial ao Nelson pela paciência, apoio, motivação, amizade e companheirismo desde os dias do ensino secundário, tornando-o um dos melhores amigos que se pode desejar manter por perto.

À Madalena e à Isabel, patroa e colega de trabalho, pelos conselhos, preocupação e ajuda, pois a amizade existe em todas as idades e só temos a aprender com a experiência dos mais vividos.

Ao Daniel, pelo carinho, dedicação e muita paciência em todos os momentos ao longo deste último ano.

Por fim, ao meu irmão, pai e mãe, porque sempre foram os meus melhores amigos, a fundação do meu carácter enquanto ser humano, por me encaminharem e encorajarem em todas as oportunidades e etapas que surgiram ao longo dos anos, e pela motivação e confiança que sempre depositaram em mim. A eles devo todo o conhecimento e suporte da minha educação e formação superior; sábios conselhos que me foram guiando e me encorajando.

# **Avaliação da sustentabilidade de materiais de pavimentação ao longo do seu ciclo de vida**

## **RESUMO**

O setor dos transportes, muito próspero e dinâmico do ponto de vista económico, confronta-se com custos sociais e ecológicos cada vez maiores, pelo que um modelo de mobilidade sustentável adquiriu cada vez mais importância. É necessário assegurar mobilidade de pessoas e mercadorias a baixo custo e de forma eficaz. Partindo deste pressuposto, é importante fazer uma abordagem de análise de ciclo de vida com o objetivo de otimizar a eficiência do sistema de transportes e a segurança, bem como reduzir o consumo de energia e o impacto ambiental.

O principal objetivo deste trabalho consiste na avaliação do consumo energético associado à resistência ao rolamento produzida pela movimentação do tráfego rodoviário, tendo em consideração a sustentabilidade de diferentes tipos de pavimento, ou seja, de que forma o desempenho dos pavimentos ao longo do seu ciclo de vida pode melhorar o consumo energético e minorar o dispêndio das energias não renováveis, contribuindo para práticas de sustentabilidade.

Neste trabalho pretende-se melhorar um método laboratorial utilizado num estudo anterior e com este analisar a influência das características mecânicas e superficiais de misturas betuminosas e em granito na resistência ao rolamento. Primeiramente, foram realizados ensaios para evidenciar a influência do peso e da pressão do pneu. Depois realizaram-se testes em lajes graníticas com quatro texturas superficiais, usualmente aplicadas em pavimentos de elevada rigidez. Em seguida produziram-se duas misturas betuminosas que diferem nos parâmetros de textura (um betão betuminoso e um betão betuminoso rugoso) e procedeu-se à caracterização das misturas através do ensaio da mancha de areia. Todos os dados foram recolhidos a partir do emparelhamento do ensaio de pista (*wheel tracking test*) com um multímetro e uma placa de aquisição de dados, para registar a energia consumida nos ensaios.

Os resultados mostraram as tendências referentes ao peso aplicado na roda, à pressão do pneu, à velocidade e à área de contacto pneu/pavimento. A nível do consumo energético em materiais com diferente textura verificou-se a sua influência, embora restem algumas dúvidas a clarificar.

**Palavras-chave:** Resistência ao rolamento, Consumos energéticos, Textura superficial, Contacto pneu/pavimento, Análise de ciclo de vida



## **Sustainability assessment of paving materials throughout their lifecycle**

### **ABSTRACT**

The transportation sector, very prosper and dynamic from an economic standpoint, is being confronted with increasing social and ecological costs, therefore a model of sustainable mobility acquires more importance. It is necessary to ensure low cost and efficient mobility of people and goods. With that in mind, it is important to approach a life cycle assessment with the optimization of the transportation system's efficiency and safety as a goal, as well as a decrease in energy consumption and environmental impact.

The main objective of this work consists in the analysis of the consumption of energy associated with the rolling resistance produced by the road traffic's movement, taking into account the sustainability of different kinds of pavement, or, in other words, the way a pavement's performance throughout its life cycle can improve the energy consumption and minimize the use of non-renewable energies, contributing therefore to more sustainable procedures.

In this work there's an attempt to improve a laboratory method used in a previous study and, with this, determine the influence of the mechanical and surface characteristics of bituminous mixtures and of the surface characteristics of granite on the rolling resistance. First, tests to denote the influence of weight and the tires pressure were conducted. Tests in granite specimens with four superficial textures, usually applied in high modulus pavements, followed. Afterwards, two bituminous mixtures were produced, different in texture (an asphalt concrete and a rough asphalt concrete), and characterized through the sand patch test. The data was gathered by pairing wheel tracking tests with a multimeter and a data acquisition board, to register the energy spent in each test.

The results showed the trends related to the weight applied to the wheel, the tire pressure, the speed and the contact area tire/surface. Concerning the energy consumption in materials with different roughness, it was noticed its influence, although there's still some doubts to clarify.

**Keywords:** Rolling resistance, Energy consumption, Superficial texture, Tire/pavement contact, Life cycle assessment



**ÍNDICE**

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1	Enquadramento temático .....	1
1.2	Objetivos.....	3
1.3	Conteúdo da dissertação .....	4
<b>2</b>	<b>ESTADO DA ARTE .....</b>	<b>5</b>
2.1	Desenvolvimento sustentável .....	5
2.1.1	Origem e evolução da sustentabilidade.....	5
2.1.2	Sustentabilidade no setor rodoviário.....	6
2.1.3	Eco Condução .....	10
2.2	Análise do ciclo de vida.....	11
2.2.1	Introdução .....	11
2.2.2	Ciclo de vida .....	12
2.2.3	Etapas relativas à elaboração da análise de ciclo de vida .....	14
2.2.4	Aplicação do ciclo de vida.....	16
2.3	Pavimentos rodoviários .....	17
2.3.1	Tipos de pavimentos .....	18
2.3.2	Misturas betuminosas.....	19
2.3.3	Fatores que influenciam o comportamento mecânico das misturas betuminosas.....	20
2.3.4	Textura do pavimento – Microtextura .....	21
2.3.5	Textura do pavimento – Macrotextura.....	23
2.3.6	Textura do pavimento - Ranhuragem .....	25
2.4	Resistência ao rolamento .....	28
2.4.1	Contacto pneu/pavimento .....	29
2.4.2	Influência do tipo de pneus .....	31
2.4.3	Impacto da aerodinâmica, velocidade e comportamento do condutor.....	33
2.5	Influência da resistência ao rolamento nos consumos de combustível.....	36
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS .....</b>	<b>39</b>
3.1	Introdução .....	39
3.2	Caracterização dos materiais utilizados nos ensaios iniciais .....	40

3.2.1	Placa lisa.....	41
3.2.2	Influência de diferentes pesos nos consumos.....	42
3.3	Caracterização de diferentes superfícies .....	42
3.4	Formulação e produção das misturas betuminosas .....	44
3.5	Caracterização dos betumes .....	48
3.5.1	Ensaio de Penetração a 25 °C.....	48
3.5.2	Ensaio de Temperatura de Amolecimento .....	49
3.6	Caracterização superficial das misturas betuminosas .....	50
3.6.1	Mancha de areia.....	50
3.7	Ensaio para avaliação da resistência ao rolamento .....	51
3.7.1	Metodologia adotada .....	51
3.7.2	Leitura e tratamento de dados .....	55
3.7.3	Metodologia de análise do ensaio .....	58
3.8	Estudo da influência da temperatura, pressão e velocidade na resistência ao rolamento.....	59
3.9	Caracterização da roda pneumática.....	60
<b>4</b>	<b>ANÁLISE DE RESULTADOS .....</b>	<b>63</b>
4.1	Introdução.....	63
4.2	Caracterização básica dos betumes .....	64
4.3	Caracterização superficial das misturas betuminosas .....	64
4.4	Consumos energéticos nos ensaios iniciais de calibração.....	65
4.4.1	Ensaio sem contacto do pneu com a superfície .....	65
4.4.2	Ensaio com contacto do pneu com a superfície.....	68
4.5	Consumos energéticos nos ensaios realizados em diferentes superfícies .....	71
4.6	Consumos energéticos nos ensaios com lajetas betuminosas .....	75
4.7	Influência da velocidade da mesa no consumo .....	79
4.8	Influência da rigidez no consumo .....	80
4.9	Medição da área de contacto pneu/superfície .....	81
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS E PERSPETIVAS FUTURAS .....</b>	<b>85</b>
5.1	Conclusões .....	85
5.2	Trabalhos futuros.....	87

**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS ..... 89**



## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Importância do transporte na oferta total de energia primária e das emissões totais de CO <sub>2</sub> , na UE-25, nos Estados Unidos e no Japão, 2004 (%) (Adaptado de (Eurostat, 2006)).....	7
Figura 2.2 – Vendas de novos veículos (%) a <i>diesel</i> entre 1995 e 2008 em vários países europeus (ACEA, 2011).....	8
Figura 2.3 – Conforto Global na gestão de uma estrada (Adaptado de Corriere e Rizzo (2012)).....	9
Figura 2.4 – Avaliação do ciclo de vida desde a extração ao descarte final (Cardim, 2012).....	13
Figura 2.5 – Fluxos de energia/materiais e interações entre as fases do ciclo de vida de pavimentos rodoviários (Adaptado de Araújo <i>et al.</i> (2014)) .....	14
Figura 2.6 – Fases de implementação da LCA (Adaptado da norma ISO (2006)).....	15
Figura 2.7 – Representação esquemática do sistema multiestratificado que compõe um pavimento rodoviário (INIR, 2009) .....	17
Figura 2.8 – Exemplos simplificados de diferentes tipos de texturas num pavimento rodoviário (adaptado de Sandberg e Ejsmont (2002)). .....	22
Figura 2.9 – Método da mancha de areia (Fontul, 2005) .....	24
Figura 2.10 – Esquema para determinação da altura média pelo método de mancha de areia (Branco <i>et al.</i> , 2008).....	24
Figura 2.11 – Tipos de textura em pavimentos rígidos: a) Textura em tapete; b) Textura com rasgos longitudinais (Adaptado de Anderson <i>et al.</i> (2012)).....	26
Figura 2.12 – Combinação de textura com rasgos transversais à esquerda e acabamento em tapete à direita (Adaptado de Anderson <i>et al.</i> (2012)).....	27
Figura 2.13 – Dimensões usuais para a textura convencional ranhurada lisa (Adaptado de Frentress (2012)) .....	27
Figura 2.14 – Dimensões usuais para a textura ranhurada com rugosidade (Adaptado de Frentress (2012)) .....	27
Figura 2.15 – Forças verticais na superfície de contacto (Adaptado de Clermont (2003)).....	30
Figura 2.16 – Atrito entre o pneu e a estrada é devido à histerese no pneu: a) Contacto pneu/pavimento; b) Resistência ao movimento (Adaptado de Ellis (1989)) .....	31
Figura 2.17 – Esquema representativo da constituição de um pneu (Automóvel, 2014).....	32
Figura 2.18 – Temperatura relativa do pneu e resistência ao rolamento durante o aquecimento (Adaptado de Gillespie (1992)) .....	33

Figura 2.19 – Perdas de energia num modelo de veículo de passageiros, em condução urbana (Adaptado de USDE (2014)) .....	34
Figura 2.20 – Perdas de energia num modelo de veículo de passageiros, em condução em via rápida (Adaptado de USDE (2014)).....	34
Figura 2.21 – Perdas de energia num modelo de veículo híbrido de passageiros, em condução em via urbana (Adaptado de USDE (2014)) .....	35
Figura 2.22 – Perdas de energia num modelo de veículo híbrido de passageiros, em condução em via rápida (Adaptado de USDE (2014)) .....	35
Figura 3.1 – Ensaio realizado sobre uma placa de madeira de superfície lisa: a) Vista superior da placa; b) Espessura da placa .....	41
Figura 3.2 – Lajeta granítica com face de textura lisa e face rugosa .....	42
Figura 3.3 – Lajeta com espaçamentos diferentes em faces e direção opostas.....	43
Figura 3.4 – Lajeta com textura ranhurada com maior espaçamento: a) Superfície e b) Pormenor dos rasgos e respetivas dimensões .....	44
Figura 3.5 – Lajeta com textura ranhurada com menor espaçamento. a) Superfície e b) Pormenor dos rasgos e respetivas dimensões .....	44
Figura 3.6 – Curva granulométrica da mistura de agregados das misturas estudadas e respetivo fuso para misturas AC 14 Surf .....	46
Figura 3.7 – Curva granulométrica da mistura de agregados das misturas estudadas e respetivo fuso para a mistura PA 14 .....	47
Figura 3.8 – Esquematização do processo de produção de misturas betuminosas .....	48
Figura 3.9 – Ensaio de Penetração a 25 °C com agulha .....	49
Figura 3.10 – Ensaio de determinação da Temperatura de Amolecimento .....	49
Figura 3.11 – Aplicação do método do ensaio da mancha de areia .....	51
Figura 3.12 – Representação do ensaio de pista sem carga complementar .....	52
Figura 3.13 – Representação do ensaio de pista com carga complementar .....	52
Figura 3.14 – Equipamento do ensaio de pista com roda pneumática: a) Com carga adicional e b) Pormenor do percurso da roda sobre a superfície .....	53
Figura 3.15 – Sistema de controlo de temperatura.....	53
Figura 3.16 – Esquema do emparelhamento de equipamentos utilizados no ensaio de avaliação de consumos energéticos .....	54
Figura 3.17 – Multímetro utilizado no ensaio de avaliação de consumos energético .....	54
Figura 3.18 – Placa de aquisição de dados utilizada no ensaio de avaliação de consumos energéticos .....	55
Figura 3.19 – Curva sinusoidal típica de um ciclo elétrico.....	55

Figura 3.20 – Vista do <i>software</i> para aquisição de dados .....	56
Figura 3.21 – Representação da energia consumida ao longo do tempo.....	58
Figura 3.22 – Características do teste <i>Durometer Shore A</i> .....	60
Figura 3.23 – Teste da rigidez do pneu: a) Equipamento <i>Durometer</i> ; b) Medição no ponto 1; c) Medição no ponto 2 .....	61
Figura 3.24 –Pneu utilizado nos ensaios: a) Pneu e secção de corte b) Almofada de proteção e carcaça; c) Secção transversal; d) Arame do talão; e) Fio da carcaça.....	61
Figura 4.1 – Variação do consumo energético (%) a partir do valor referência.....	67
Figura 4.2 – Representação das retas de consumo de energia em função do peso.....	70
Figura 4.3 – Resultados da energia obtidos nos grupos 1 e 2 com contacto da roda com peso.....	71
Figura 4.4 – Variação da energia medida no grupo 3 de ensaios: a) sem peso; b) com peso.....	73
Figura 4.5 – Resultados da energia obtidos no grupo 4 de ensaios: a) sem peso; b) com peso.....	74
Figura 4.6 – Resultados da energia obtidos no grupo 5 de ensaios: a) sem peso; b) com peso.....	75
Figura 4.7 – Características superficiais das misturas betuminosas: a) Mistura PA 14; b) Mistura AC 14.....	76
Figura 4.8 – Resultados da variação de energia obtidos no grupo 6 (ensaios nas misturas betuminosas) por comparação com a superfície lisa .....	77
Figura 4.9 – Resultados da energia obtidos no grupo 7 de ensaios nas misturas betuminosas .....	77
Figura 4.10 – Resultados da energia obtidos no grupo 8 de ensaios nas misturas betuminosas .....	78



**LISTA DE TABELAS**

Tabela 3.1 – Análise granulométrica dos agregados utilizados (norma EN 933-1).....	45
Tabela 3.2 – Quantidade de material usado na mistura betuminosa AC 14.....	46
Tabela 3.3 – Quantidade de material usado na mistura betuminosa PA 14 .....	46
Tabela 4.1 – Caracterização básica dos betumes utilizados nas misturas betuminosas .....	64
Tabela 4.2 – Profundidade média de textura no ensaio de mancha de areia .....	65
Tabela 4.3 – Pesos dos materiais utilizados em quilogramas.....	66
Tabela 4.4 – Resumo dos dados obtidos nos ensaios de calibração sem contacto pneu/superfície .....	66
Tabela 4.5 – Relação entre os consumos dos diferentes materiais com pesos distintos.....	67
Tabela 4.6 – Resumo dos dados obtidos nos ensaios de calibração com contacto pneu/superfície .....	68
Tabela 4.7 – Valores de energia, em função do peso, para definição das retas de calibração .....	69
Tabela 4.8 – Ensaio realizados para avaliação da influência de diferentes parâmetros nos consumos energéticos .....	70
Tabela 4.9 – Dados e resultados dos ensaios efetuados em diferentes superfícies .....	72
Tabela 4.10 – Dados e resultados dos ensaios efetuados nas misturas betuminosas .....	76
Tabela 4.11 – Influência da frequência no consumo do equipamento de ensaio .....	79
Tabela 4.12 – Influência da rigidez no consumo energético .....	80
Tabela 4.13 – Representação da área de contacto pneu/pavimento, nas quatro superfícies graníticas, para 1,5 bar de pressão.....	82
Tabela 4.14 – Representação da área de contacto pneu/pavimento, nas quatro superfícies graníticas, para 3,0 bar de pressão.....	83



# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Enquadramento temático

Desde sempre que o ser humano procurou melhorar a qualidade de vida, porém, o crescimento exponencial populacional e o consequente desenvolvimento tecnológico conduziram a uma utilização abusiva dos recursos naturais não renováveis, da ocupação do solo, de uma produção em larga escala de resíduos e efluentes quer líquidos quer gasosos, assim como a alteração dos vários ecossistemas naturais que por sua vez podem interpor-se diretamente com o ambiente envolvente (Whatne, 2010).

Dada a necessidade de solucionar os problemas subjacentes ao desenvolvimento, surgiu no século XX o conceito de desenvolvimento sustentável<sup>1</sup> sendo uma temática que tem atualmente cada vez mais interesse, com finalidade principal a melhoria da “saúde” do nosso planeta, uma vez que este sofre sérias ameaças de alterações climáticas, aumento significativo da poluição e emissões excessivas e prejudiciais (CIB e UNEP-IETC, 2002).

As três dimensões abordadas pela sustentabilidade são a dimensão ambiental, dimensão social e a dimensão económica (Bendtsen, 2004). O erro do Homem é explorar a natureza para além da sua capacidade de renovação, o que implica adotar novos caminhos e novos estilos de vida para o desenvolvimento descentrados do lucro e bem-estar pessoal e focados no bem-estar coletivo e no respeito pela dignidade humana e pela natureza (Nunes, 2010). Tal como muitas outras áreas, o desenvolvimento sustentável afeta também a construção civil. É então necessário proceder à criação de um caminho onde haja um equilíbrio saudável entre as três dimensões, ou seja, pretende-se que a sustentabilidade seja economicamente eficaz, socialmente equitativa e ecologicamente sustentável (Navarro e Gama, 2006).

A construção e manutenção das infraestruturas rodoviárias provocam impactos ambientais consideráveis, portanto, torna-se indispensável a busca por novas técnicas e processos cujo objetivo é a minoração das consequências. As vias de comunicação necessitam de uma enorme quantidade de recursos e energia além da energia já utilizada na construção e manutenção. Dado

---

<sup>1</sup> Desenvolvimento sustentável, conceito do Relatório Brundtland “Nosso Futuro Comum”, publicado em 1987, elaborado pela Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, definido como “aquele que satisfaz as necessidades do presente sem comprometer a capacidade de as gerações futuras poderem também satisfazer as suas”.

que a energia caracteriza um dos principais impulsores de desenvolvimento, cada vez mais se deve ter a noção de que é preciso recorrer à implementação de boas práticas ambientais mais sustentáveis na construção de infraestruturas rodoviárias. Torna-se então, relevante avaliar a sustentabilidade de uma estrada estipulando parâmetros relacionados com a construção e manutenção, exploração, nomeadamente a resistência ao rolamento.

Uma vez que questões como o avanço da ciência, questões sociais e ambientais se focam na energia consumida pelo tráfego rodoviário, então o consumo de combustível nos períodos de utilização das vias assume um papel preponderante na sustentabilidade deste tipo de infraestruturas. Estes consumos dependem de diversas características entre elas a resistência ao rolamento e propriedades dos pavimentos. A qualidade superficial exigida aos pavimentos rodoviários tem por base a segurança, conforto e comodidade dos utentes. Porém, as contribuições ambientais da camada de desgaste não são ainda tidas em consideração por defeito. Assim, se estes fatores forem ignorados haverá uma maior quantidade de desperdício de recursos e índice de poluição ambiental.

Como o crescimento populacional e o desenvolvimento tecnológico, também a intensificação dos padrões de consumo provocam um aumento de consumo de energia à escala mundial, escala esta que se torna cada vez mais insustentável do ponto de vista económico e ambiental.

A mobilidade rodoviária rege-se por uma das fontes de energia, combustíveis fósseis, cujas quantidades na natureza se encontram limitadas. A crescente dependência dos transportes do petróleo e o aumento do número de viagens por passageiro têm dado origem a problemas sociais, económicos e ambientais como o consumo ineficiente no setor dos transportes.

Têm sido realizados estudos por investigadores ao nível da resistência ao rolamento, estimando quanto combustível se pode economizar num veículo, se este circular num pavimento de rugosidade mais baixa. Para além do estudo da rugosidade, a rigidez é também um parâmetro que tem sido reconhecido como influente nos consumos de combustível, comparando pavimentos flexíveis com pavimentos rígidos. Torna-se fundamental garantir que os materiais utilizados na estrutura dos pavimentos, além de permitirem reduzir o consumo de combustível, sejam duráveis, para aumentar a sustentabilidade da solução.

Segundo um estudo realizado por (DeRaad, 1977), a resistência ao rolamento aumenta com o aumento da rugosidade. Este fundamento é também confirmado em (Wang *et al.*, 2012), onde se confirma que um pavimento em betão tem uma menor resistência ao rolamento do que um pavimento betuminoso.

O ensaio a realizar para avaliar algumas analogias do consumo de combustível de um veículo real numa situação de condução real, relacionando o consumo com a variação das condições de circulação, características dos pavimentos, é o ensaio de pista (na terminologia algo-saxónica, *Wheel Tracking Test*). Trata-se de um ensaio simples que simula o rolamento de um pneu num pavimento rodoviário, mais propriamente com o intuito de avaliar as rodeiras, deformações permanentes, mas que pode ser utilizado para avaliar os consumos energéticos.

## 1.2 Objetivos

O principal propósito deste trabalho é a avaliação do consumo energético associado à resistência ao rolamento produzida pela movimentação do tráfego rodoviário, tendo em consideração a sustentabilidade de diferentes camadas de desgaste. Pretende-se desenvolver e avaliar esta temática através de um estudo laboratorial, dado que o período de tempo necessário para se realizar um estudo em medição direta dos consumos num cenário real não se adequaria. O ensaio laboratorial que permitirá a avaliação da resistência ao rolamento é o ensaio de pista, ou *Wheel Tracking Test*, que juntamente com um conjunto de equipamentos conectados a este permitirão a medição dos consumos energéticos associados. Por meio de uma análise comparativa, análoga ao que se espera, entre o desempenho das diferentes misturas, identificar-se-á qual a que provoca menor consumo de energia, e conseqüentemente menor resistência ao rolamento.

Nesse sentido pretende-se estudar de que forma as diferentes texturas superficiais influenciam o consumo energético em superfícies cujas propriedades se evidenciam o máximo possível. Primeiramente serão realizados ensaios para evidenciar a influência da rugosidade, peso e pressão do pneu e distinguir as variáveis mais suscetíveis de causar variação nos resultados. De seguida serão realizados testes em lajetas graníticas que representam quatro superfícies distintas utilizadas em pavimentos de elevada rigidez. Por fim, tendo em conta os requisitos impostos pelo Caderno de Encargos de pavimentação (Estradas de Portugal, 2009) serão realizadas duas

misturas betuminosas com características superficiais distintas e avaliada a caracterização superficial.

### **1.3 Conteúdo da dissertação**

Esta dissertação encontra-se dividida em cinco capítulos, sendo que o presente capítulo se encontra incluído e pretende enquadrar o tema, definir os principais objetivos e descrever o conteúdo da dissertação.

O Capítulo 2 apresenta o estudo realizado sobre os vários aspetos a abordar nesta dissertação, referindo estudos executados anteriormente, realçando a importância da sustentabilidade na pavimentação e a análise do ciclo de vida para identificação de possíveis medidas de sustentabilidade e uso de energia alternativas. São descritos os tipos de pavimentos rodoviários e as principais características que influenciam a resistência ao rolamento, nomeadamente a textura do pavimento e fatores ligados ao comportamento mecânico das misturas betuminosas, assim como o contacto entre o pneu e a superfície e a própria influência do tipo de pneu utilizado.

No Capítulo 3, tal como o nome indica, Materiais e Métodos, são mencionados os materiais utilizados neste trabalho, bem como todos os procedimentos de produção das misturas betuminosas e na medição dos consumos nas diversas situações em análise. De referir que neste capítulo estão descritos os ensaios de caracterização dos betumes, formulação das misturas betuminosas e respetiva caracterização superficial.

No que concerne ao Capítulo 4, são apresentados os resultados dos ensaios de caracterização dos betumes e das misturas betuminosas e respetiva análise, assim como dos consumos energéticos obtidos nos diferentes materiais utilizados e relações sobre a medição da área de contacto entre o pneu e a superfície dos vários pavimentos.

No último capítulo apresentam-se as principais conclusões obtidas neste estudo, bem como alguns aspetos que poderiam ser mais investigados e objeto de estudos futuros, que poderão contribuir para enriquecer este trabalho e esclarecer as dúvidas que restaram.

## 2 ESTADO DA ARTE

### 2.1 Desenvolvimento sustentável

#### 2.1.1 Origem e evolução da sustentabilidade

O conceito de sustentabilidade resume a complexa questão da compatibilidade, a nível mundial, entre os valores económicos, ambientais e sociais. O tratamento deste tema nasceu da consciência de uma contradição fundamental entre o crescimento da procura de material bruto e recursos limitados (Corriere e Rizzo, 2012). A primeira realização desta situação remonta à publicação, pelo Clube de Roma, do relatório intitulado "Os Limites do Crescimento", no qual se deve realçar que o crescimento do termo não se refere a um aumento puramente quantitativo de indicadores económicos em vez da dimensão qualitativa (Meadows *et al.*, 1972).

As três dimensões estão cada vez mais aleadas neste mundo globalizado e transparente. Esta ênfase renovada no consumo e produção é destinada a abordar o facto de que os ganhos obtidos na eficiência da produção estão a ser transpostos pelo aumento global da procura por produtos e serviços. Esta crescente procura por produtos e serviços origina um crescimento económico, ajuda a reduzir a pobreza e a melhorar a qualidade de vida. No entanto, conduz a um aumento do consumo de recursos e contínuo elevado nível de emissão de substâncias perigosas e a uma rápida mudança de tipos de uso da terra com os respetivos impactos negativos para o meio ambiente.

O “Desenvolvimento Sustentável” definido no relatório de Brundtland em 1987, é atualmente referido pelo mesmo conceito de que a sustentabilidade é uma visão global de uma forma de desenvolvimento não só económico, mas também social, de que o crescimento económico ocorre dentro dos limites dos ecossistemas ecológicos. Se o homem "consome" mais do que o ambiente pode fornecer, ou se ele polui os recursos, não haverá possibilidade de desenvolvimento sustentável (Corriere e Rizzo, 2012).

Na Primeira Conferência Internacional de Construção Sustentável, em Tampa, no ano de 1994, definiu-se construção sustentável como “a criação e a gestão responsável de um ambiente

construído saudável baseado na eficiência dos recursos e nos princípios ecológicos”(CIB, 1999).

Assim como o plano da “Agenda 21” define o 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”, também outras organizações e conferências sobre construção sustentável se baseiam no mesmo conceito de um ambiente construído assente na eficiência dos recursos e princípios ecológicos (CIB, 1999).

Cada definição adotada para a sustentabilidade teve em conta o contexto temporal e a realidade de cada local de intervenção, e mesmo assim, o próprio conceito tem vindo a sofrer alterações no seu entendimento e interpretação apoiando-se e adaptando-se aos contextos sociais, políticos e económicos (CIB e UNEP-IETC, 2002). Logo é natural que as ações de sustentabilidade hoje em dia sejam diferentes, mais completas e complexas, o que pode provocar ligeiras divergências no entendimento geral do conceito. Apesar disso, é entendimento geral de que é necessário proceder à criação de um caminho onde haja um equilíbrio saudável entre as três dimensões, ou seja, pretende-se que a sustentabilidade seja economicamente eficaz, socialmente equitativa e ecologicamente sustentável.

### **2.1.2 Sustentabilidade no setor rodoviário**

O número de veículos tem aumentado em diferentes partes do mundo. O rápido crescimento económico em muitos países em desenvolvimento e o aumento do bem-estar da população nas nações industrializadas levou à expansão da indústria automobilística mundial. O número de veículos na estrada aumentou consideravelmente e o congestionamento do tráfego é observado nas principais cidades do mundo, incluindo os países em desenvolvimento e industrializados (Saboohi e Farzaneh, 2008).

A realização de infraestruturas de transporte produz efeitos significativos sobre o ecossistema, a economia e sobre a produtividade social, dado o consumo considerável de recursos não renováveis (Corriere e Rizzo, 2012). O setor dos transportes é o maior consumidor de energia e produtor de gases de efeito estufa na União Europeia, apesar dos avanços na tecnologia do

transporte e combustível terem resultado em reduções acentuadas nas emissões de certos poluentes (Eurostat, 2006).

O uso da análise de ciclo de vida como um instrumento para sustentabilidade remete para o uso destas análises nos modelos de construção de pavimentos em práticas de transporte sustentáveis. A sustentabilidade nos transportes tem também várias facetas (Nathman, 2008).

O transporte é mais sucintamente definido como um catalisador para o progresso. O contrário é também verdade, podendo aferir-se que a falta de meios de transporte é considerada uma das principais causas de pobreza em muitas áreas isoladas em todo o mundo. Esta simples constatação infere que um maior acesso a meios de transporte económicos e seguros conduzirá inevitavelmente a uma comunidade global mais justa e próspera (Nathman, 2008).

O transporte representa globalmente uma das mais importantes atividades humanas. É multidimensional de importância histórica, social, ambiental, política e económica. Em suma, o transporte tem contribuído para o desenvolvimento e defesa de muitas civilizações, apoia e molda estruturas sociais, é moldado pelas atividades económicas, emite poluentes para o meio ambiente, sendo investido e regulamentado através do governo.

Tanto o meio ambiente como a energia são temas de cariz individual, mas claramente quando se associam remetem para o tema da sustentabilidade dos transportes, onde o consumo e as emissões estão intimamente ligados: o que vai para o tanque de combustível sai do tubo de escape em forma de emissões (Eurostat, 2006). A Figura 2.1 indica a importância do transporte na oferta total de energia primária e das emissões totais de CO<sub>2</sub> na União Europeia, nos Estados Unidos e no Japão, referentes ao ano 2004.

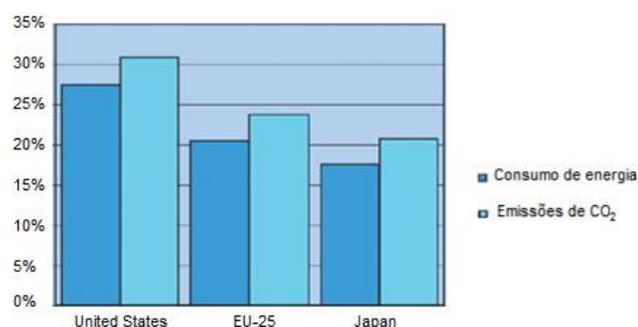


Figura 2.1 – Importância do transporte na oferta total de energia primária e das emissões totais de CO<sub>2</sub>, na UE-25, nos Estados Unidos e no Japão, 2004 (%) (Adaptado de (Eurostat, 2006))

Quase todo o consumo de energia do setor dos transportes consiste em combustíveis fósseis. Na verdade, de acordo com a Agência Europeia do Ambiente, a UE-25 é 98% dependente deles. A queima de combustíveis fósseis produz dióxido de carbono e outros gases resultantes da atividade humana, muitos deles prejudiciais à saúde humana (Eurostat, 2006).

Em termos de tecnologia dos veículos, enquanto os Estados Unidos da América se mantiveram quase completamente dependentes de gasolina, o mercado europeu optou pelo emprego de veículos a *diesel*, como mostrado na Figura 2.2, com países como Portugal, França e Espanha atingindo valores nas vendas de veículos novos a diesel até 80 %.

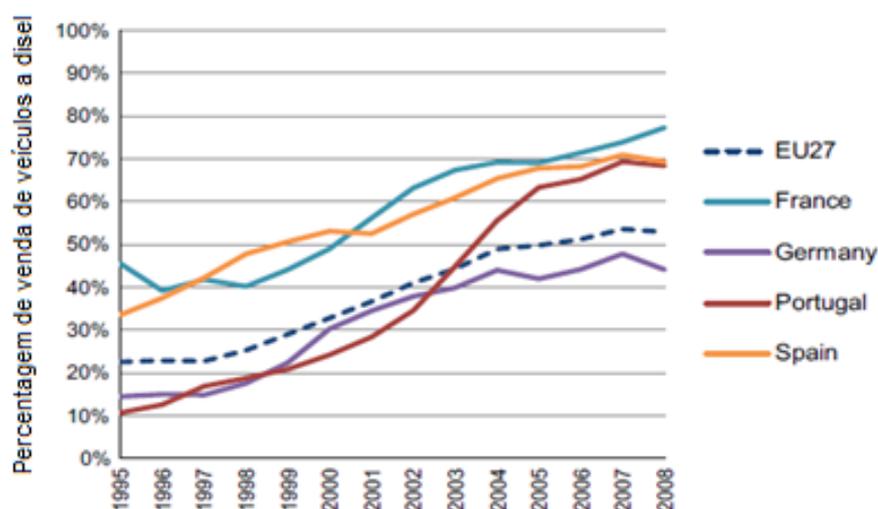


Figura 2.2 – Vendas de novos veículos (%) a *diesel* entre 1995 e 2008 em vários países europeus (ACEA, 2011)

Entre 1990 e 2004 as emissões de CO<sub>2</sub> por parte dos transportes rodoviários aumentou aproximadamente 26% e constitui agora 12% do total de CO<sub>2</sub> emitido na Europa (Schmidt e Ullidtz, 2010). De acordo com Thomas (2014) os transportes produzem quase um quarto do total das emissões de gases com efeito de estufa (GEE) da UE-27. Contudo, o setor dos transportes está ainda muito longe de contribuir de maneira perceptível para os objetivos climáticos da UE, que visam uma redução das emissões de CO<sub>2</sub> pelo menos em 20 % relativamente ao nível de 1990, até 2020.

O documento, pertencente à União Europeia, intitulado de “Política Europeia de Transportes para 2010” bem como outros documentos semelhantes, reconhece as amplas implicações do

setor dos transportes e refere que é hora de encontrar alternativas para resolver esta crescente afluência do transporte. Por outras palavras, as decisões políticas que envolvem o setor devem ser tomadas com uma influência definida para ser abrangente e de longa duração. Aleada a esta enorme influência sobre a economia global está a dependência do transporte sobre um fornecimento contínuo de energia (Thomas, 2014).

O conforto global na utilização de uma estrada (Figura 2.3) é o conjunto de sensações físicas e mentais, dependentes do conjunto "Homem-Estrada-Veículo-Ambiente", que dão ao utente um estado de percepção ótimo utilizando a estrada em todos os aspetos do seu desempenho global e envolvendo a realização do triplo objetivo: segurança, eficiência e qualidade ambiental (Corriere, 2010). Considerando que o processo de conceção, construção, manutenção e operação de infraestruturas rodoviárias é unitário, é necessário o desenvolvimento de técnicas e estratégias para a obtenção do nível pré-determinado de segurança, qualidade ambiental e obtenção de eficiência para assegurar a observância dos requisitos (Corriere e Rizzo, 2012).

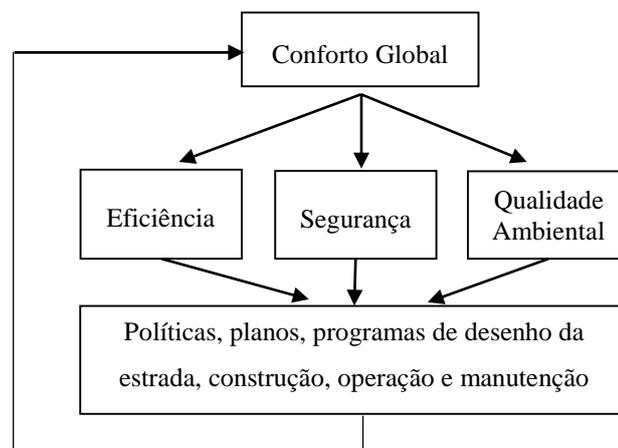


Figura 2.3 – Conforto Global na gestão de uma estrada (Adaptado de Corriere e Rizzo (2012))

Melhorar a sustentabilidade do setor dos transportes claramente requer uma abordagem mais abrangente e integrada, que concilie as políticas de transportes, ambiente e energia. Isso exige políticas que combinam a legislação com os instrumentos económicos, através de uma mudança em mente desde ações "fim-de-linha" até medidas mais preventivas (Eurostat, 2006).

### 2.1.3 Eco Condução

Muitas investigações da política de eco condução relataram potenciais reduções no consumo de combustível e nas emissões de CO<sub>2</sub> que variam de 5% a 40% em várias jurisdições e iniciativas (Alam e McNabola, 2014). Para limitar e reduzir estes impactos negativos têm sido tomadas iniciativas para controlo da poluição do ar no setor dos transportes.

Exemplos do controlo da taxa de emissões incluem: a introdução de sistemas de tributação dos veículos com base de carbono (Lautso *et al.*, 2004), melhorias na tecnologia dos veículos, tais como catalisadores, combustíveis alternativos, e eficiência do motor (Manzie *et al.*, 2007). Outras intervenções que têm visto uma redução na quantidade de emissões incluíram taxas de congestionamento e melhorias em incentivos para a utilização de transportes públicos (Atkinson *et al.*, 2009). Uma abordagem diferente que promove a redução da intensidade de emissões de veículos é a eco condução, um método baseado no comportamento do condutor, que começou a receber uma atenção mais focada na literatura.

A ideia de eco condução não é nova e sua integração nos cursos de condução data de 1993 (Saboohi e Farzaneh, 2008). A eco condução tem sido definida como um processo de tomada de decisão que vai influenciar a economia de combustível e a intensidade das emissões de um veículo para reduzir o seu impacto ambiental. Estas decisões incluem: decisões estratégicas (manutenção do veículo), decisões táticas (seleção da rota e carregamento de veículos) e decisões operacionais (comportamento do condutor durante a condução) (Alam e McNabola, 2014).

O objetivo da eco condução tem sido a aliviação da condição do meio ambiente local, através da melhoria do comportamento na condução e do fluxo de tráfego local. A sua implementação leva à melhoria da qualidade do ambiente local e reduz os custos de combustível e os custos de manutenção por meio da redução condução agressiva e da manutenção de uma velocidade constante (Saboohi e Farzaneh, 2008).

## 2.2 Análise do ciclo de vida

### 2.2.1 Introdução

A crescente consciencialização sobre a importância da proteção ambiental e dos possíveis impactes associados a produtos manufacturados e consumidos tem aumentado o interesse pelo desenvolvimento de métodos para melhor compreender e reduzir os mesmos. Uma das técnicas em desenvolvimento para este propósito é a Avaliação do Ciclo de Vida.

O uso adequado de materiais, produtos e tecnologias de construção de pavimentação pode contribuir significativamente para um melhor desempenho ambiental do ciclo de vida de um pavimento e, por conseguinte, para a sua sustentabilidade. A análise de ciclo de vida (LCA<sup>2</sup>) é internacionalmente reconhecida como se tratando de uma técnica de análise abrangente para a avaliação dos impactes ambientais associados a um sistema, produto ou serviço durante todo o seu ciclo de vida. Numa grande maioria de vezes, este método também pode ser reconhecido pelo acrónimo LCEA<sup>3</sup>, para fins de diferenciação da avaliação de aspetos ambientais e da avaliação de outro tipo de pontos como os económicos e sociais (Bragança e Mateus, 2011).

Como foi referido, a Avaliação do Ciclo de Vida (LCA) é uma abordagem bastante útil para a quantificação dos potenciais impactes ambientais associados ao ciclo de vida de um sistema, produto ou serviço. Esta avaliação é essencialmente quantitativa uma vez que se identificam a energia e materiais consumidos e os respetivos resíduos libertados para o meio ambiente. Como medida complementar, este método poderá ainda ser utilizado na avaliação e implementação de medidas de possibilitem um melhoramento do desempenho ambiental dos produtos em vários pontos do seu ciclo de vida (Nathman, 2008).

Contribui para a tomada de decisões na indústria, organizações governamentais ou não governamentais, como por exemplo o planeamento estratégico e definição de prioridades, ajuda na seleção de indicadores pertinentes de desempenho ambiental incluindo técnicas de medição e em questões de marketing como o caso de uma declaração ambiental ou um programa de rotulagem ecológica ou declaração ambiental de produto (Bragança e Mateus, 2011).

---

<sup>2</sup> Acrónimo da expressão da língua inglesa “Life-cycle Analysis”.

<sup>3</sup> Acrónimo da expressão da língua inglesa “Life-cycle Environmental Analysis”.

O processo de Avaliação do Ciclo de Vida surgiu há algumas dezenas de anos e desde aí que tem sido utilizado, contudo, apenas foi normalizado nos finais dos anos 90 pela Organização Internacional de Normalização (ISO 14040) (Milachowski *et al.*, 2011). Esta Norma descreve os princípios e a estrutura para se conduzir e descrever estudos de LCA e inclui certos requisitos mínimos. Em 2006, as normas de ISO 14040, 14041, 14042 e 14043 foram compiladas nas normas ISO 14040 (2006) e 14044 (2006) (Cardim, 2012):

- ISO 14040. *Life Cycle Assessment. Principles and Framework*. (2006) (Avaliação do Ciclo de Vida. Princípios e Enquadramento)
- ISO 14044. *Life Cycle Assessment. Requirements and Guidelines*. (2006) (Avaliação do Ciclo de Vida. Requisitos e Orientações).

Uma vez que se trata de uma norma relativamente recente, cujas fases de técnica de avaliação ainda se encontram em estado inicial de desenvolvimento, é importante que os resultados do LCA sejam interpretados e aplicados apropriadamente para se poder complementar o nível prático desenvolvendo e adquirindo experiência prática.

### **2.2.2 Ciclo de vida**

Um aspeto fulcral nesta análise de ciclo de vida é nomeadamente a influência que todo este processo tem no meio ambiente. Assim, podem colocar-se questões relativamente à opção pela reciclagem, ao uso de recursos renováveis, à eficiência energética e aos produtos locais. A reciclagem envolve questões como o consumo no transporte devido à logística e processos que levam a outro tipo de impactos ambientais. Relativamente aos recursos renováveis, pode haver uma redução da durabilidade ou aumento de durabilidade com o uso de produtos tóxicos (Cardim, 2012).

O ciclo de vida completo de uma estrada tem sido estudado, incluindo a extração de matérias-primas, a produção de materiais de construção, o processo de construção, a manutenção e a operação da estrada e, finalmente, a eliminação / reutilização da estrada, no final do ciclo de vida (fim do período de tempo em análise) (Stripple, 2001). A Figura 2.4 remete para a técnica para avaliar os impactos ambientais desde a extração dos recursos da natureza ao descarte final do produto.

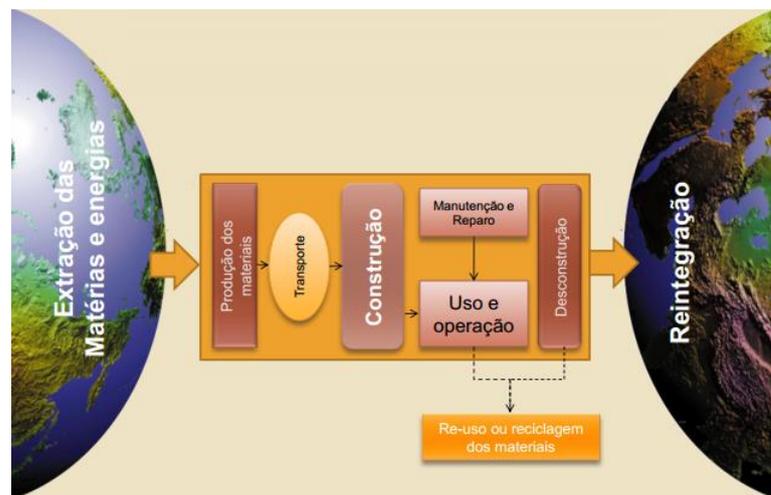


Figura 2.4 – Avaliação do ciclo de vida desde a extração ao descarte final (Cardim, 2012).

De outro modo, a metodologia desenvolvida para o ciclo de vida dos pavimentos, considera cinco fases (Araújo *et al.*, 2014):

1. Extração de materiais e produção – inclui a extração e britagem de agregados, a produção de ligantes (cimento, betume ou betume emulsão) e produção de misturas (betuminoso ou hidráulica), o transporte de materiais e misturas e o equipamento e atividades inerentes ao carregamento dos caminhões.
2. Construção – todas as atividades essenciais para a construção do pavimento, como a terraplanagem, o reforço da fundação e aplicação de camadas de pavimentos.
3. Uso – devem ser estudadas as diferenças em termos de resistência ao rolamento e, conseqüentemente, do consumo de energia e as emissões libertadas, que dependem do tipo de pavimento e das suas características.
4. Manutenção – engloba as operações que serão feitas na estrada para garantir que as condições do pavimento são mantidas adequadas durante a sua vida. Dependendo da estratégia adotada pela administração rodoviária, as operações de manutenção preventiva ou as técnicas de reabilitação mais complexas podem ser implementadas, incluindo a substituição da superfície ou uma sobreposição de pavimento.
5. Fim de vida – sucede quando a estrada chegar ao fim da sua vida útil. Dependendo da estratégia adotada pela administração rodoviária será possível proceder à sua recuperação (reconstrução), demolição e remoção de materiais que ainda podem ser reciclados ou simplesmente deixar a estrada como se encontra, tornando-se uma solução pouco ambiental.

A Figura 2.5 representa esquematicamente as interações entre as várias fases apresentadas acima e da energia/fluxos de materiais.

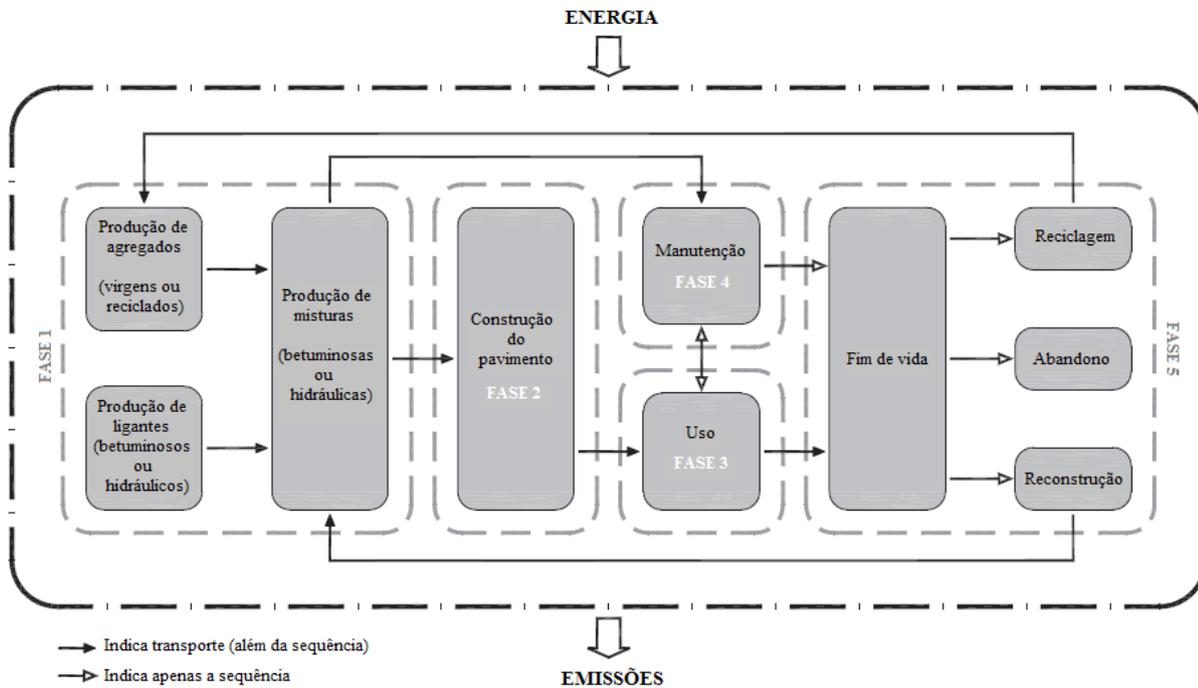


Figura 2.5 – Fluxos de energia/materiais e interações entre as fases do ciclo de vida de pavimentos rodoviários (Adaptado de Araújo *et al.* (2014))

A demolição final de uma estrada é geralmente incluída na sua manutenção e alguns dos materiais constituintes são reutilizados. A maioria das estradas não tem um fim de vida. São reconstruídas ou substituídas por uma nova estrada, enquanto a antiga estrada continua em funcionamento (Stripple, 2001).

### 2.2.3 Etapas relativas à elaboração da análise de ciclo de vida

A análise do ciclo de vida é uma metodologia analítica cujo objetivo é avaliar o conteúdo em recursos e os impactos ambientais associados ao ciclo de vida de um produto. Segundo Bragança e Mateus (2011) as aplicações mais importantes das ferramentas LCA são:

- Análise da contribuição das diversas fases do ciclo de vida para o impacto ambiental global. Esta aplicação tem como objetivo a definição de prioridades nos processos de seleção de materiais ou produtos;
- Comparação entre produtos para comunicação interna ou externa.

Como referido anteriormente, o método LCA está normalizado desde os anos 90 pela Organização Internacional de Normalização (ISO 14040) e reforça a ideia de ser necessário divulgar os resultados de forma clara, criteriosa e ponderada e torna-se evidente a grande utilidade destas ferramentas para a otimização dos processos produtivos das empresas, desde a origem, extração das matérias-primas, até ao produto final (Huang *et al.*, 2012).

De acordo com a norma ISO (2006) ISO 14040 e exposto na Figura 2.6, a execução de uma análise de ciclo de vida é dividida em quatro fases, tornando-se num processo iterativo:

- Definição do objetivo e do âmbito;
- Inventário de ciclo de vida;
- Avaliação dos impactes de ciclo de vida;
- Interpretação.

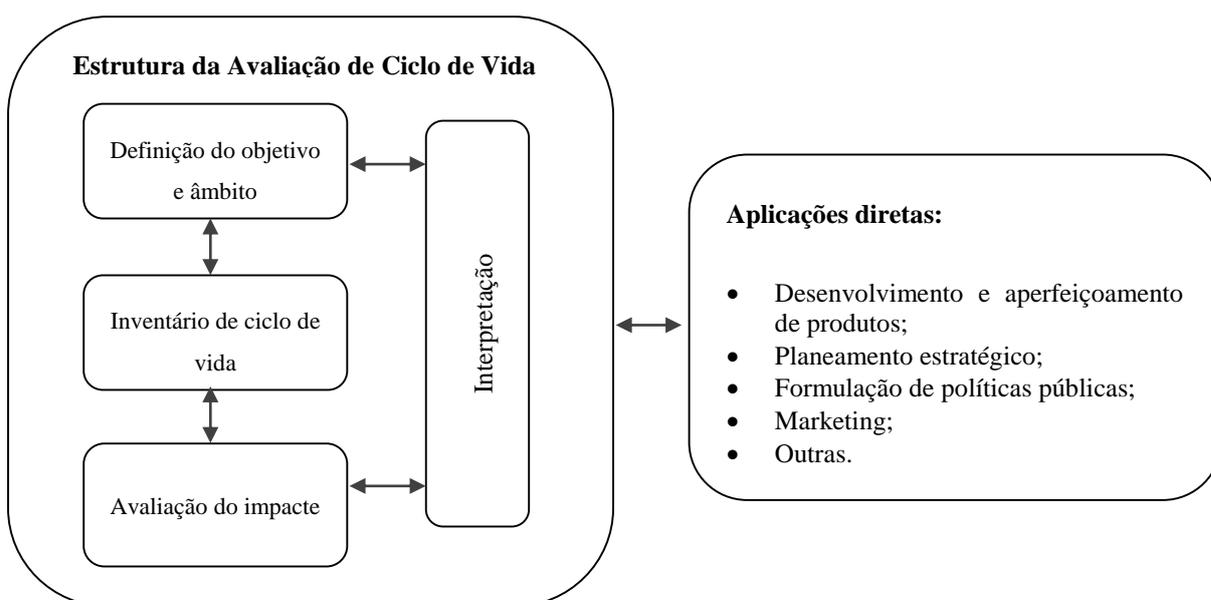


Figura 2.6 – Fases de implementação da LCA (Adaptado da norma ISO (2006))

O objetivo do estudo deve estar descrito nesta secção por se tratar de um passo importante em que devem constar, em grande medida, as escolhas de limitações do sistema e da metodologia (Stripple, 2001).

Tal como acontece em todos os modelos, é preciso compreender que um modelo é uma simplificação da realidade, o que significa que a realidade está distorcida de algum modo.

Então, o desafio do praticante de LCA é desenvolver modelos que evitem essas distorções e simplifiquem os resultados pretendidos (Bragança e Mateus, 2011). Na norma ISO 14040 é referido que “o objetivo de estudo de avaliação do ciclo de vida deve expor de forma não ambígua a aplicação planeada, as razões para levar a cabo o estudo e a audiência pretendida, ou seja, a quem irão ser comunicados os resultados” (Huang *et al.*, 2012). O âmbito deve ser suficientemente bem definido para assegurar que a extensão, a profundidade e o detalhe do estudo sejam compatíveis o suficientes, para atingir os objetivos planeados (Bragança e Mateus, 2011).

A metodologia de análise de ciclo de vida aplicada a uma estrada é enumerada em quatro etapas: caracterização da estrada, caracterização dos materiais, caracterização dos equipamentos e processos e um inventário de ciclo de vida (Araújo *et al.*, 2014).

O inventário de ciclo de vida abrange a recolha, descrição e averiguação de dados e ainda a modelação do sistema do produto (Bragança e Mateus, 2011). Descreve os fluxos de materiais e de energia para o sistema e os que lhe pertencem. O sistema é composto em diferentes etapas, tais como a extração de matérias-primas, o transporte, a produção, o consumo e a eliminação de resíduos (Stripple, 2001).

#### **2.2.4 Aplicação do ciclo de vida**

A LCA tem um elevado grau de importância na medida de comparar as diversas soluções que satisfazem o desempenho estipulado, mas que diferem em termos de impactos ambientais. Embora existam várias ferramentas LCA autenticadas, nem todas são usadas pelos intervenientes no ciclo de vida, e na maioria dessas ferramentas e sistemas o desempenho ambiental é avaliado com base nas propriedades de determinados materiais, como por exemplo: o conteúdo reciclado e potencial de reciclagem ou as distâncias percorridas desde o local de produção até ao local de construção (Milachowski *et al.*, 2011). Como o método de quantificação do desempenho ambiental não é semelhante nas diversas ferramentas e sistemas, também os resultados de uma avaliação não serão iguais nem passíveis de comparação (Bragança e Mateus, 2011).

De acordo com a iniciativa do Ciclo de Vida da UNEP/SETAC<sup>4</sup>, cujo objetivo é alcançar o desenvolvimento sustentável, a LCA também possui limitações, entre elas a existência de critérios subjetivos, limitações do conhecimento científico acerca dos impactos ambientais, a carência de um método consolidado e a elevada quantidade de dados (Bragança e Mateus, 2011).

### 2.3 Pavimentos rodoviários

Dada a necessidade do ser humano se deslocar tornou-se fundamental desenvolver estradas com melhores condições do que os existentes caminhos destinados a circulação a pé ou a veículos de tração animal. Parte-se desta necessidade para executar pavimentos para melhorar a rede de transportes. Atualmente não se pode colocar em questão a enorme importância e influência dos pavimentos na economia da exploração rodoviária e, portanto, na economia geral dos países (Pereira, 1971).

Os pavimentos rodoviários são estruturas constituídas por diversas camadas ligadas ou não (Figura 2.7), com função essencial assegurar uma superfície de rolamento que permita a circulação dos veículos com comodidade e segurança sob a ação do tráfego e das condições climáticas, devendo garantir que durante a sua vida útil não ocorrem danos que comprometam as suas condições de serviço (Branco *et al.*, 2008).

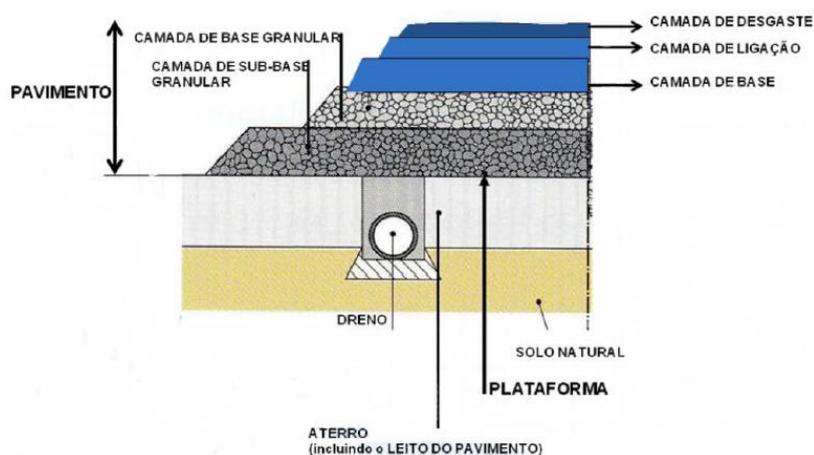


Figura 2.7 – Representação esquemática do sistema multiestratificado que compõe um pavimento rodoviário (INIR, 2009)

<sup>4</sup> Abreviatura de United Nations Environment Programme/The Society of Environmental Toxicology and Chemistry

Dependendo dos diferentes materiais utilizados na sua constituição, resultam diferentes tipos de pavimentos com comportamentos distintos, quando afetados pelo tráfego, velocidade de circulação do tráfego e pelas condições climáticas, sendo que o processo de evolução da sua qualidade é bastante complexo (Pereira e Miranda, 1999).

### **2.3.1 Tipos de pavimentos**

Os pavimentos flexíveis apresentam uma diversa constituição, em função da intensidade de tráfego, da capacidade de suporte do solo de fundação e como já referidos, das características dos materiais disponíveis (Pereira e Miranda, 1999).

Os pavimentos flexíveis convencionais são sistemas em camadas com melhores materiais no topo, onde a intensidade do esforço é maior (Huang, 1993), isto é, contém misturas betuminosas nas suas camadas superiores e materiais granulares, não ligados, nas camadas subjacentes (INIR, 2009). A adesão a este princípio de projeto torna possível a utilização de materiais locais e geralmente resulta num modo mais económico (Huang, 1993). São pavimentos constituídos por exemplo por macadame, betão betuminoso, solo-cimento, entre outros materiais (Pereira, 1971). Do ponto de vista funcional, a camada de desgaste deve contribuir para uma superfície de rolamento com conforto e segurança. Do ponto de vista estrutural, tem a função de transmitir as cargas dos veículos às camadas inferiores assim como impermeabilizar o pavimento, evitando a entrada de água para as camadas inferiores e para a fundação (Branco *et al.*, 2008).

Os pavimentos semirrígidos apresentam características comuns aos pavimentos flexíveis e aos pavimentos rígidos (INIR, 2009) e possuem a camada superior de materiais ligados com ligantes betuminosos aplicada sobre uma camada de materiais granulares tratados com ligantes hidráulicos, e uma camada de sub-base estabilizada mecanicamente (Santos e Pereira, 2002). Portanto, são pavimentos que apresentam características comuns aos pavimentos flexíveis, sendo a camada base que diferencia este tipo de pavimento (Pereira e Miranda, 1999).

Os pavimentos rígidos têm uma constituição e modo de funcionamento bastante diferenciados relativamente aos pavimentos flexíveis (Pereira e Miranda, 1999). São compostos por uma camada superior constituída por materiais estabilizados com ligantes hidráulicos, seguida de, ou uma camada granular de transição também estabilizada com ligante hidráulico ou uma

camada de sub-base. A sua função estrutural é garantida pela elevada resistência a flexão das lajes de betão. No entanto, estes esforços de flexão provocam grandes extensões de compressão e tração que poderão ser evitados reforçando o dimensionamento. Assim os pavimentos rígidos dividem-se em cinco categorias em função do modo de controlo do fendilhamento por retração (Branco *et al.*, 2008). É usual designar este tipo de pavimento como pavimentos pouco deformáveis, constituídos geralmente por betão de cimento, sem armaduras, armado, ou pré-esforçado (Pereira, 1971).

### 2.3.2 Misturas betuminosas

As misturas betuminosas são normalmente aplicadas em camadas de pavimentos rodoviários aeroportuários durante a sua construção e reabilitação, tanto em pavimentos flexíveis como em semirrígidos.

Com o princípio de que a rede viária assume uma elevada importância para o desenvolvimento de qualquer país através da garantia de boa acessibilidade a vários pontos do território (Branco *et al.*, 2008), a EAPA (*European Asphalt Pavement Association*) definiu como objetivo principal a promoção do uso correto das misturas betuminosas por forma a construir e manter a sustentabilidade da rede viária na Europa. Assim, todos os anos a EAPA providencia dados relativos à produção, aplicação e utilização das misturas betuminosas e de betume na Europa (EAPA, 2011), dos quais se pode verificar um decréscimo da produção de misturas betuminosas a quente e temperadas entre 2007 e 2010, e um aumento em 2011. Refere ainda que em Portugal foram produzidas 6,4 milhões de toneladas por ano, enquanto a Alemanha impera com uma produção de 50 milhões.

O comportamento das misturas betuminosas depende de um conjunto alargado de fatores, relacionados com a ação do tráfego, a temperatura e composição volumétrica das misturas. É por isso que, ao ser efetuada a análise laboratorial de uma mistura betuminosa, é importante definir as condições de ensaio (temperatura, frequência de carregamento e estado de tensão) (Baptista e Picado-Santos, 2006).

Os materiais granulares têm como principal função a criação de um esqueleto pétreo resistente às ações provocadas pelo tráfego, e constituem cerca de 90 % a 95 % do peso total da mistura betuminosa.

No que concerne ao ligante, os produtos derivados do petróleo bruto (betumes asfálticos) são os mais utilizados porque apresentam características termoplásticas e elevada viscosidade à temperatura ambiente. Segundo (Widyatmoko e Elliott, 2008) este tipo de ligantes pode ser encontrado em depósitos naturais ou em rochas asfálticas e é um material adesivo e impermeável derivado do crude.

### **2.3.3 Fatores que influenciam o comportamento mecânico das misturas betuminosas**

As misturas betuminosas tradicionais são constituídas por três componentes, agregados, betume e ar. As propriedades de uma mistura betuminosa dependem assim das proporções de cada um dos seus constituintes (composição volumétrica) bem como das características associadas a cada um deles (Branco *et al.*, 2008).

O tráfego é uma das importantes ações que afetam o comportamento mecânico dos pavimentos rodoviários. As ações decorrentes da circulação dos veículos nos pavimentos são função do tipo de eixo e do tipo de rodado, da resistência ao rolamento e pressão de enchimentos dos pneus, da velocidade dos veículos e da duração do tempo de aplicação dessas cargas. O aumento da pressão de enchimento dos pneus faz com que a área de contacto entre o pneu e o pavimento seja mais reduzida concentrando-se as tensões todas somente nessa área (Gardete, 2006).

A velocidade de tráfego também influencia o comportamento dos pavimentos flexíveis. Para velocidades de tráfego baixas existe um tempo de carregamento superior, ou seja, se a carga estiver sobre uma determinada zona do pavimento durante mais tempo, as deformações obtidas serão superiores, provocando também um aumento da parcela da deformação irreversível (Chen *et al.*, 2004).

Para além da ação do tráfego, também a ação dos agentes climatéricos, entre os quais a temperatura e a pluviosidade, são fatores fundamentais a considerar no estudo do comportamento dos pavimentos rodoviários.

A temperatura ambiente afeta de forma significativa o comportamento das misturas betuminosas pois influencia a viscosidade do betume, condicionando a rigidez das camadas betuminosas (Gardete, 2006). Quando a temperatura do pavimento aumenta, o betume torna-se mais fluido, provocando a deformabilidade das misturas betuminosas.

#### **2.3.4 Textura do pavimento – Microtextura**

Até hoje, o perfil geométrico da superfície de um pavimento tem sido tradicionalmente dividido em diferentes escalas, no que respeita a segurança, conforto, ruído e propriedades óticas. A textura de um pavimento é determinada pelas suas irregularidades superficiais, que vão desde os mais finos detalhes da microtextura, passando pelas particularidades da macrotextura até às maiores ondulações da megatextura (Sandberg e Ejsmont, 2002).

Além de os pneus estarem na origem da resistência ao rolamento, também o pavimento contribui significativamente para este aspeto. Como é de esperar, a profundidade média da textura de um pavimento influencia a resistência ao rolamento, uma vez que confere mais atrito no contacto com o pneu. A textura é essencialmente uma medida da comodidade e segurança dos condutores, tornando-se num parâmetro necessário para a conservação das vias, na medida em que influencia de forma indireta a aderência entre o pneu e o pavimento, e diretamente a capacidade de evacuação da água presente na interface dos dois (Azevedo, 2001).

É sabido que as ações entre o pavimento e os veículos dependem tanto das características do veículo (suspensão e pneus), como do movimento (velocidade e aceleração) e do perfil da via (irregularidades e micro, macro e megatextura). Para descrever a textura superficial é usual considerar três aspetos: microtextura, macrotextura e megatextura (Azevedo, 2001).

A Figura 2.8 apresenta exemplos simplificados de vários tipos de texturas num pavimento rodoviário.

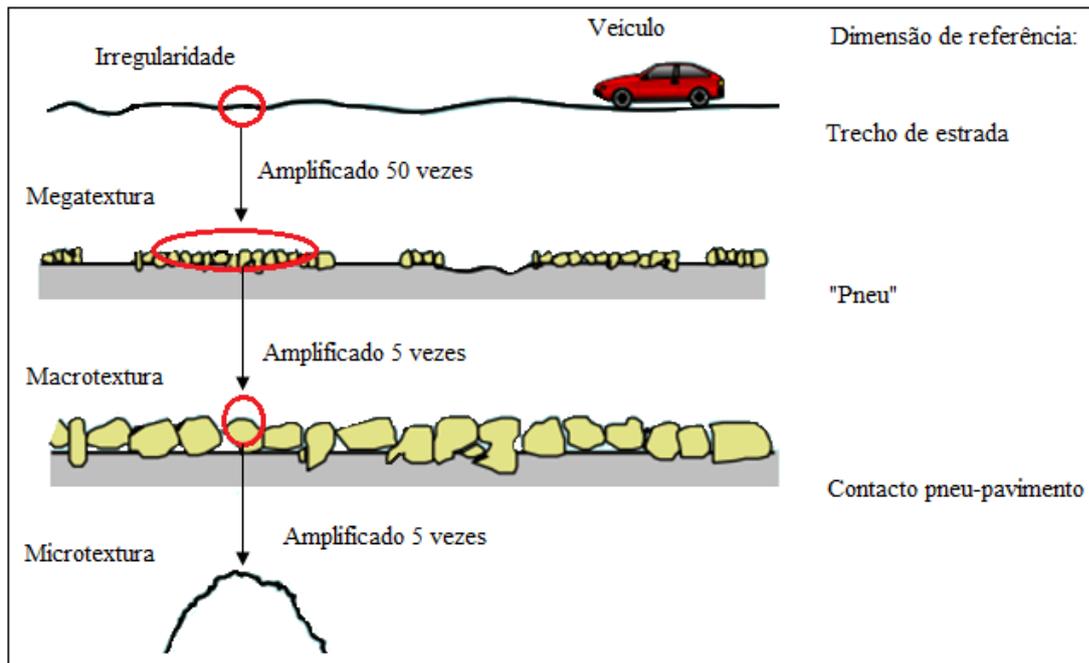


Figura 2.8 – Exemplos simplificados de diferentes tipos de texturas num pavimento rodoviário (adaptado de Sandberg e Ejsmont (2002)).

A microtextura pode ser traduzida pelo estado de polimento dos agregados, uma vez que se refere à rugosidade em pequena escala, correspondendo a comprimentos de onda inferiores a cerca de 0,5 mm, e sendo devida às asperezas da superfície das partículas (Branco *et al.*, 2008).

Segundo a classificação da PIARC (2000), a microtextura corresponde a comprimentos de onda compreendidos entre 1  $\mu\text{m}$  e 0,5mm, com amplitudes verticais entre 1  $\mu\text{m}$  e 0,2mm.

Assim, a microtextura possibilita classificar a superfície de mais ou menos áspera, mas em modo geral é tão pequena que não se pode observar a “olho nu”. A textura superficial, medida numa escala de aspereza em micron, é conhecida por ser função da mineralogia e petrologia das partículas dos agregados, definindo-se como a irregularidade superficial dos componentes pétreos individuais da camada de desgaste.

A microtextura é muito importante para a aderência entre o pneu e o pavimento, pois afeta diretamente as qualidades antiderrapantes que este deve possuir. A característica individual mais importante dos agregados para determinar as qualidades antiderrapantes é o polimento. Superfícies com partículas de microtextura “afiadas” apresentam uma grande resistência à derrapagem com o piso molhado, para velocidade baixas, mas sem a ajuda da macrotextura,

exibem um declínio no valor do coeficiente de atrito logo que a velocidade aumenta. Por outro lado, a ação do tráfego contribui para o polimento da superfície, reduzindo a microtextura.

A microtextura é também função das propriedades das partículas dos agregados e é mais significativa para baixas velocidades, embora alguns investigadores defendam que tem influência para qualquer velocidade (Chelliah *et al.*, 2003) e ainda para qualquer tipo de condições meteorológicas, seja para pavimento molhado ou seco.

### **2.3.5 Textura do pavimento – Macrotextura**

A macrotextura está relacionada essencialmente com as condições superficiais e representa a presença de fendas, rodeiras, lombas e outras irregularidades superficiais (Menziés e Zucchetto, 2006). Segundo a classificação da PIARC, corresponde a comprimentos de onda compreendidos entre 0,5 e 50 milímetros, com amplitudes verticais entre 0,1 e 20 milímetros, e está ligada à composição granulométrica dos materiais da camada de desgaste e/ou aos tratamentos de superfície, tais como a ranhuragem ou o incrustamento de gravilhas pré-envolvidas em betume (PIARC, 2000). Esta escala é responsável pela vibração dos veículos e pelo comportamento que os amortecedores possam ter assim como a deflexão dos pneus, influenciando o consumo energético. Por outro lado, a megatextura reflete-se na irregularidade da superfície.

Um dos métodos de avaliação da macrotextura é o método da mancha de areia, Figura 2.9, o qual tem vindo a ser usado desde há bastante tempo para medir a textura de pavimento. Consiste no espalhamento sobre a superfície um determinado volume de uma areia monogranular que é rasada e espalhada numa mancha circular com um dispositivo de peso normalizado, até preencher as depressões da superfície, e ficar nivelada com as saliências. O diâmetro médio da mancha de areia permite o cálculo da profundidade média da textura superficial, que resulta da divisão do volume de areia pela área da superfície do círculo (Fontul, 2005). Na Figura 2.10 é apresentado um esquema para determinação da altura média pelo método da mancha de areia.



Figura 2.9 – Método da mancha de areia (Fontul, 2005)

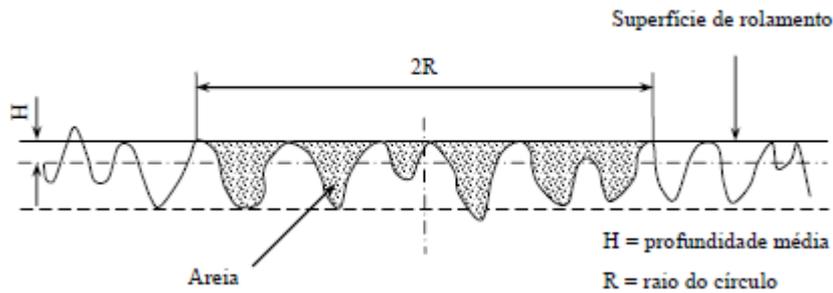


Figura 2.10 – Esquema para determinação da altura média pelo método de mancha de areia (Branco *et al.*, 2008)

Existem outros métodos de medição da textura das superfícies, nomeadamente a utilização do laser de alta frequência, que permite determinar com precisão o perfil da superfície. Estes equipamentos podem medir zonas com larguras até 1,0 m, têm a capacidade de captar irregularidades longitudinais da superfície com incrementos de 0,2 mm e possuem resolução vertical até 0,01 mm (Fontul, 2005). Este método tem a grande vantagem de poder registar valores da textura em contínuo (Branco *et al.*, 2008), ao contrário do método da mancha de areia que se caracteriza como um ensaio pontual.

A rugosidade e a macrotextura são propriedades quantificáveis através do método da profundidade média do perfil (*Mean Profile Depth – MPD*). Este método permite estimar a profundidade média da textura e comparar os resultados com os obtidos no ensaio de mancha de areia. A irregularidade longitudinal do pavimento é classificada através do índice *International Roughness Index (IRI)*, recorrendo à utilização de perfilómetros equipados com laser, ou ultra-sons, para o levantamento do respetivo perfil longitudinal. A irregularidade pode definir-se pelo conjunto de desnivelamentos da superfície provocados por defeito do pavimento que causam a vibração dos veículos (Branco *et al.*, 2008). É um fator determinante nas

condições de rolamento dos veículos, condicionante diretamente o conforto e a segurança da circulação, com importantes consequências económicas como o desgaste dos veículos. Aumenta as ações dinâmicas exercidas sobre os pavimentos devido à passagem dos veículos, com conseqüente aceleração da degradação da capacidade de carga.

A textura de um pavimento é importante também para avaliar por exemplo, resistência à derrapagem e a resistência ao rolamento, ou ainda a emissão de ruído que resulta do contacto do pneu com o pavimento. De acordo com Bendtsen (2004), os consumos de combustível num pavimento muito rugoso, mistura aberta, podem ser 11% mais elevados do que num pavimento extremamente macio.

De uma forma geral, é exigido dos pavimentos o respeito pela geometria definida no projeto, ou seja, não deverá conter deformações permanentes em perfil transversal, conhecidas como rodeiras, ou em perfil longitudinal, nem conter defeitos localizados de superfície como covas, depressões, fendas e materiais soltos (Branco *et al.*, 2008). Estas exigências têm como finalidade evitar o desgaste mecânico do veículo, a redução dos consumos de combustível e conseqüente emissão de poluentes e manter as características funcionais como o conforto para o utente.

### **2.3.6 Textura do pavimento - Ranhuragem**

Ranhuragem é uma medida de macrotextura produzida através de um equipamento que confere rugosidade ao pavimento seguido de uma máquina composta com um gancho de aço que produz o efeito de rasgos em pavimentos rígidos. Esta macrotextura melhora o atrito em pavimentos molhados providenciando canais de fuga para a água acumulada em entre o pneu e a superfície. A direção da textura deverá ser longitudinal ao sentido de tráfego a menos que o líder do projeto permita de outra forma (Transportation, 2013).

A IGGA (*International Grooving and Grinding Association*) trabalha essencialmente com este tipo de textura superficial nos pavimentos, descreve seis diferentes texturas que podem ser construídas utilizando a técnica *Diamond Grinding*, desde a convencional ranhurada com rugosidade e ranhurada lisa, entre outros (Frentress, 2012). O tipo de textura com ranhuras ajuda

na drenagem do pavimento, providencia estabilidade numa direção e, conseqüentemente, reduz o número de acidentes durante os períodos de chuva (Martinez e Young, 1976).

As principais vantagens do emprego das texturas com rasgos nos pavimentos são aumentar o atrito e a segurança, torna as irregularidades da superfície numa superfície mais coerente e é ambientalmente amigável. Por outro lado, traz desvantagens na construção, na ligação das juntas, cria rodeiras mais polidas do que a textura inicial e transmite níveis de ruído insatisfatórios (Frentress, 2012).

De acordo com um estudo realizado sobre o desempenho dos pavimentos rígidos construídos numa estrada federal de Washington (Anderson *et al.*, 2012), as estradas foram construídas utilizando-se três tipos de textura: em tapete, rasgos na longitudinal (Figura 2.11) e rasgos na transversal (Figura 2.12). As estradas foram monitorizadas para o desgaste, atrito e ruído provocado pelo contacto pneu/pavimento. Os resultados obtidos neste estudo mostraram que o tapete e os rasgos na longitudinal eram igual ou melhores do que os rasgos na transversal, no que diz respeito ao desgaste e atrito. Outras conclusões retiradas foram acerca dos níveis de ruído, onde a textura em tapete e os rasgos longitudinais se encontram dentro da gama normalmente expectável.



Figura 2.11 – Tipos de textura em pavimentos rígidos: a) Textura em tapete; b) Textura com rasgos longitudinais (Adaptado de Anderson *et al.* (2012))



Figura 2.12 – Combinação de textura com rasgos transversais à esquerda e acabamento em tapete à direita (Adaptado de Anderson *et al.* (2012))

As dimensões usuais das texturas ranhurada lisa e ranhurada com rugosidade estão expressas na Figura 2.13 e na Figura 2.14, respectivamente. A textura ranhurada lisa pode estar orientada longitudinalmente ou transversalmente ao sentido de tráfego, reduz a aquaplanagem e reduz até 70 % acidentes em superfície molhada, tem menor custo do que a textura convencional ranhurada com rugosidade e pode ser empregue em pavimentos rígidos e em betuminosos (Frentress, 2012).

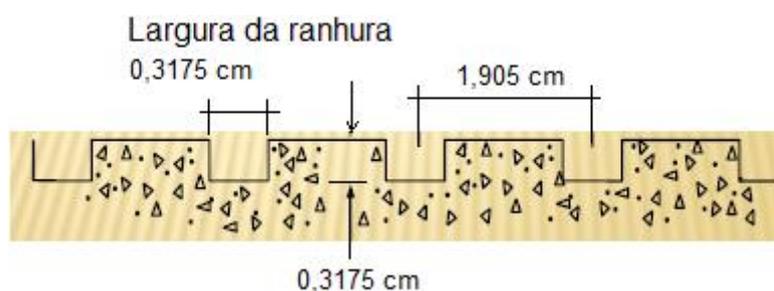


Figura 2.13 – Dimensões usuais para a textura convencional ranhurada lisa (Adaptado de Frentress (2012))



Figura 2.14 – Dimensões usuais para a textura ranhurada com rugosidade (Adaptado de Frentress (2012))

A textura longitudinal providencia estabilidade direcional e reduz o efeito de aquaplanagem (Frentress, 2012). Um estudo da Universidade Marquette mostrou que os rasgos longitudinais resultam num pavimento silencioso e que não diminui o fator de atrito a um grau que possa ser considerado um risco de segurança. Não foi detetada uma diferença significativa no desempenho entre uma superfície com textura longitudinal e uma superfície com textura transversal, em condições meteorológicas de chuva e pavimento molhado. A pesquisa concluiu que o desempenho das superfícies com rasgos longitudinais e das superfícies com rasgos transversais é semelhante em todas as condições testadas e tiveram a vantagem de serem silenciosas em quase todos os casos (Transportation, 2013).

## **2.4 Resistência ao rolamento**

A resistência ao rolamento é uma das mais importantes propriedades funcionais dos pavimentos rodoviários, e são aplicáveis a toda a rede rodoviária, o que significa que as autoridades rodoviárias precisam ter a maior informação possível sobre esta temática a fim de serem capazes de a controlar. A importância referente à resistência ao rolamento tem aumentando progressivamente ao longo do tempo por afetar o consumo de energia e a emissão de gases de efeito estufa (Sandberg, 2011).

A resistência ao rolamento é um fenómeno físico que ocorre, quando por exemplo, uma roda gira sobre uma superfície, também pode ser definida pela força requerida para mover um veículo sobre a superfície na qual ele está a rolar, ou seja é definida pela perda de energia por unidade de distância. A velocidade é um parâmetro que influencia a resistência ao rolamento, sendo que esta aumenta se a velocidade também aumentar (Bendtsen, 2004).

A força de resistência ao rolamento é principalmente devida às propriedades viscoelásticas dos compostos de borracha usados no fabrico dos pneus. Os pneus quando são deformados dissipam energia sobre 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. A repetida deformação dos pneus causa uma perda de energia devida a um fenómeno que provoca uma força de resistência ao rolamento. Deste modo, e segundo a norma ISO 8767, a resistência ao rolamento de um pneu é definida como sendo a energia consumida por um pneu por unidade de distância percorrida (Santos, 2012).

Sublinha-se ainda que a resistência ao rolamento num pneu é frequentemente calculada a partir dos parâmetros de funcionamento dos pneus e na sua forma, e pode não corresponder a uma força física real, por isso deve ser medido como a perda de energia por distância percorrida. Esta conceção é vantajosa, pois reflete a verdadeira situação em veículos, e está diretamente relacionado com a eficiência de combustível do veículo (Sandberg, 2011).

#### **2.4.1 Contacto pneu/pavimento**

O único ponto de contacto com o pavimento são os pneus e as duas funções básicas para além de suportarem o peso do veículo, são a mitigação de choques provocados pela superfície da estrada e providenciar o controlo das forças longitudinais e laterais presentes nos fenómenos de aceleração, nas viragens e na travagem (Menzies e Zucchetto, 2006).

Como foi referido, no contato do pneu com o pavimento ocorrem perdas de energia, o que implica que com maiores perdas de energia, os consumos energéticos sejam mais elevados. A principal causa da perda energética do pneu deve-se ao facto dos elementos do pneu estarem sucessivamente submetidos a vibrações (Bendtsen, 2004).

A textura da superfície da estrada cria deflexões no pneu o que provoca perdas de energia extra no pneu, se a borracha do pneu não estiver livre de um fenómeno denominado de histerese (Sandberg, 2011). Este fenómeno é a principal causa pela resistência ao rolamento dos pneus numa superfície rígida. Também ocorre histerese devido à deflexão da superfície do pavimento, no entanto a deformação nos pneus tem a contribuição mais importante nesse fenómeno (Menzies e Zucchetto, 2006). Em casos extremos, o efeito da textura pode ser igualmente grande como o das perdas de energia no pneu medido sobre uma superfície plana e completamente lisa. Algumas perdas de energia devidas à resistência ao rolamento são ainda consumidas na estrada ou no pavimento, em vez de serem perdidas no interior do pneu, o que não deve acontecer (Sandberg, 2011).

Enquanto um material puramente elástico recupera toda a energia imposta num determinado carregamento quando este é removido, um material puramente viscoso não recupera qualquer energia, sendo toda esta energia que deformou o material convertida na forma de calor (Menzies e Zucchetto, 2006)

Como foi referido, os materiais viscoelásticos como a borracha dos pneus, apresentam um comportamento que combina a recuperação elástica com alguma perda de energia (Menzies e Zucchetto, 2006). Esta perda de energia que ocorre no pneu transforma-se em calor, e deve-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 ao atrito na área de contato entre o pneu e o pavimento.

Quando é medida a reação normal entre a superfície de contacto do pneu e a superfície na qual este se desloca, conclui-se que a força é maior na parte frontal do pneu do que na sua retaguarda. A força resultante de todas estas forças será assim a montante do eixo da roda. Esta translação da força normal ao peso do carro (a resultante, apresentada na Figura 2.15 como Z) leva a que haja um binário oposto ao sentido de rotação das rodas. Por sua vez, esta força designada de força de resistência ao rolamento, é devida à perda de energia causada pela deformação do pneu na zona de contacto.

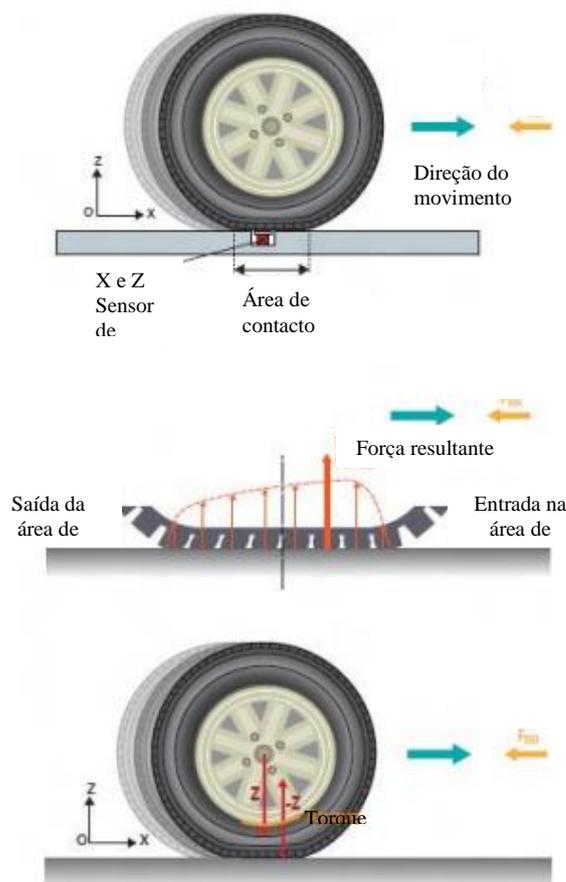


Figura 2.15 – Forças verticais na superfície de contacto (Adaptado de Clermont (2003))

Conforme já salientado, a resistência ao rolamento é o resultado de uma interação entre o pneu e o pavimento, e é bastante difícil distinguir entre os efeitos no pneu e os do pavimento. Algumas perdas nos pneus são muito afetadas pelas propriedades do pavimento e, portanto, apresentam-se de seguida dois efeitos de relativo interesse (Sandberg, 2011):

- O desnivelamento da estrada fará com que o pneu seja movido para cima e para baixo, e as forças correspondentes criarão uma mudança nas deflexões dos pneus;
- A textura da estrada irá conceber deflexões locais e corte da faixa de rodagem na zona de contacto, o que resulta em forças, não apenas na direção vertical.

#### 2.4.2 Influência do tipo de pneus

Desde a sua invenção, o pneu tem vindo a ser alvo de desenvolvimento, primeiramente para satisfazer as necessidades do conforto no andamento de uma bicicleta e mais tarde para satisfazer as exigências mais rigorosas da indústria automóvel e de aeronaves.

Quando o pneu entra em contacto com a superfície da estrada a borracha da banda de rodagem molda-se às rugosidades da superfície sendo que a maior parte da deformação ocorre no interior do pneu e a estrada permanece relativamente inalterada. Há um fator adicional a contabilizar relativo ao movimento da roda nas rugosidades mais salientes e a resistência total de deslizamento terá componentes devido ao processo de atrito típico e pelo trabalho gerado pelo movimento (Ellis, 1989).

A Figura 2.16 representa o deslizamento do pneu na estrada que provoca esta força local em pontos altos da superfície para se mover através da borracha. Segundo Ellis (1989), o ciclo de carga/descarga absorve energia devido à histerese e, assim, é necessária uma força para manter o movimento mesmo na ausência de atrito mecânico. Este efeito é mostrado como uma assimetria no diagrama de pressão na Figura 2.16 b).

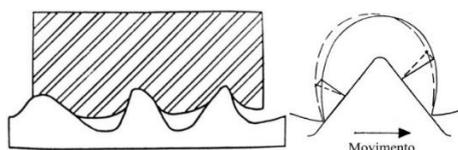


Figura 2.16 – Atrito entre o pneu e a estrada é devido à histerese no pneu: a) Contacto pneu/pavimento; b) Resistência ao movimento (Adaptado de Ellis (1989))

Segundo Schmidt e Ullidtz (2010) o efeito de histerese no material constituinte do pneu pode representar entre 80 a 90% da resistência ao rolamento, sendo o principal responsável na sua contribuição. Uma vez que a histerese do pneu está fundamentalmente relacionada com a deformação viscoelástica da borracha usada na construção do pneu, mudanças na formulação do material e a sua quantidade afetam a resistência ao rolamento (Menzies e Zucchetto, 2006).

Sendo o contacto pneu-pavimento responsável pela resistência ao rolamento, é evidente que esta vai ser influenciada pelo tipo de pneu, o seu padrão textural e o material com que é produzido. Consequentemente estes parâmetros vão também afetar o consumo de combustível. O desenho do piso e as paredes laterais do pneu são tão importantes como a rigidez da borracha usada no seu fabrico na contribuição para a resistência ao rolamento (Bendtsen, 2004).

Um aumento da pressão do pneu contribui para uma redução na resistência ao rolamento (Ejsmont, 1990). A inflação na pressão afeta também a deformação do pneu, esta geralmente reduz-se, tendo como consequência uma redução no efeito de histerese quando a pressão aumenta, o que origina uma resistência ao rolamento menor (Wong e Wiley, 2001).

De forma sucinta, o pneu é constituído por várias camadas de borracha dispostas em torno de uma estrutura ou carcaça, geralmente feita em tela e/ou arame (Figura 2.17). É esta estrutura que impede que o pneu se deforme quando sujeito ao esforço da pressão (Automóvel, 2014).

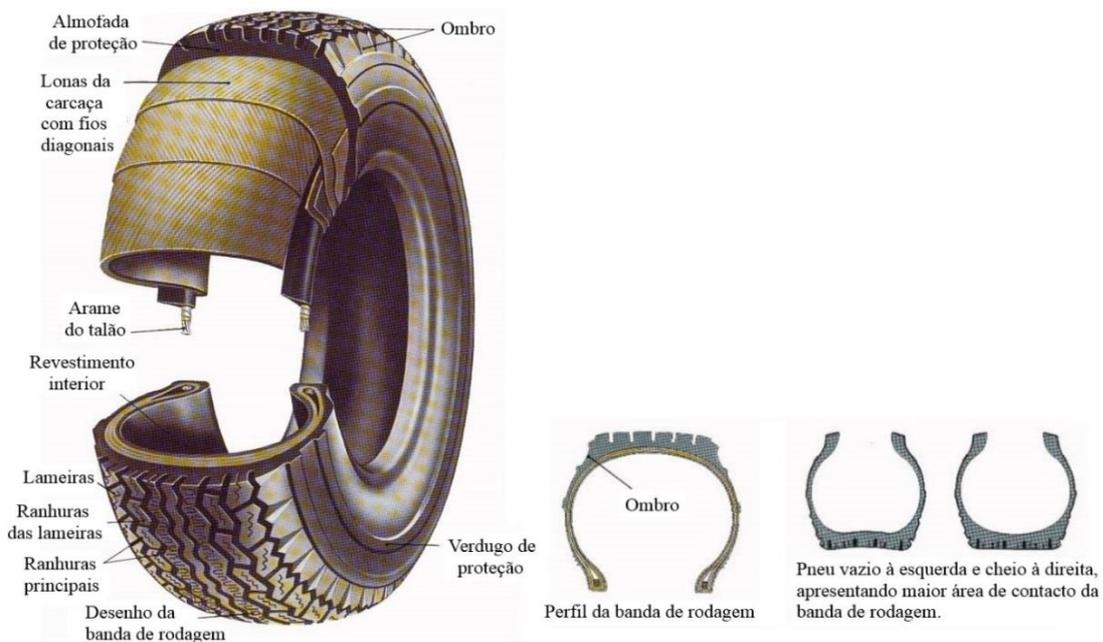


Figura 2.17 – Esquema representativo da constituição de um pneu (Automóvel, 2014)

Numa situação típica em que um pneu começa a rolar a partir de uma condição a frio, a temperatura vai subir e a resistência ao rolamento irá diminuir ao longo de um primeiro período do percurso. A Figura 2.18 mostra as alterações relativas na temperatura e na resistência ao rolamento que vão ocorrer. O pneu deve percorrer uma distância de pelo menos 20 milhas (32,187 km) antes do sistema atingir um nível estável. Para viagens curtas os pneus do automóvel nunca aquecem o suficiente para beneficiar dos mais baixos níveis possíveis de resistência ao rolamento (Gillespie, 1992).

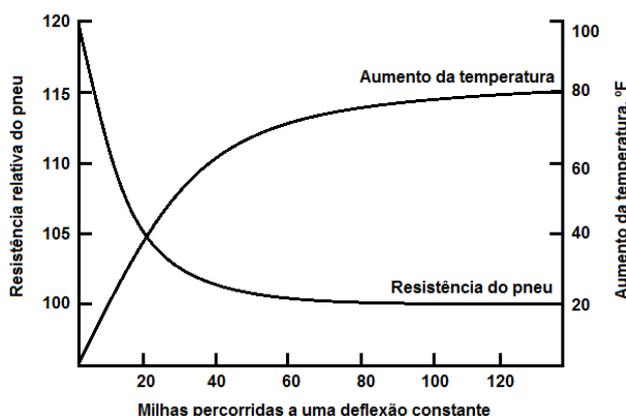


Figura 2.18 – Temperatura relativa do pneu e resistência ao rolamento durante o aquecimento (Adaptado de Gillespie (1992))

### 2.4.3 Impacto da aerodinâmica, velocidade e comportamento do condutor

Os efeitos provocados pela aerodinâmica são maiores para velocidades elevadas, pois a resistência provocada está diretamente relacionada com a forma física do veículo e a sua área frontal. Formas mais regulares podem reduzir a resistência ao ar entre 20 a 30% (USDE, 2012). Como visto no tópico anterior, também a aerodinâmica dos pneus possui um papel fulcral nas resistências relacionadas com o movimento do veículo. Quanto maior for a velocidade praticada, maior será a influência da aerodinâmica do pneu na resistência ao rolamento, como comprova Menzies e Zucchetto (2006) ao referir que a resistência aerodinâmica causa maior consumo de energia em vias rápidas pois estas forças de resistência são proporcionais à velocidade do veículo.

O Departamento de Energia dos Estados Unidos em parceria com o Laboratório Nacional de Oak Ridge, efetuaram estimativas de perdas de energia baseando-se numa análise a mais de 100 veículos de teste. Os resultados apresentados na Figura 2.19 e na Figura 2.20 representam um esquema das perdas de energia para diferentes cenários de condução, num veículo movido a gasolina.

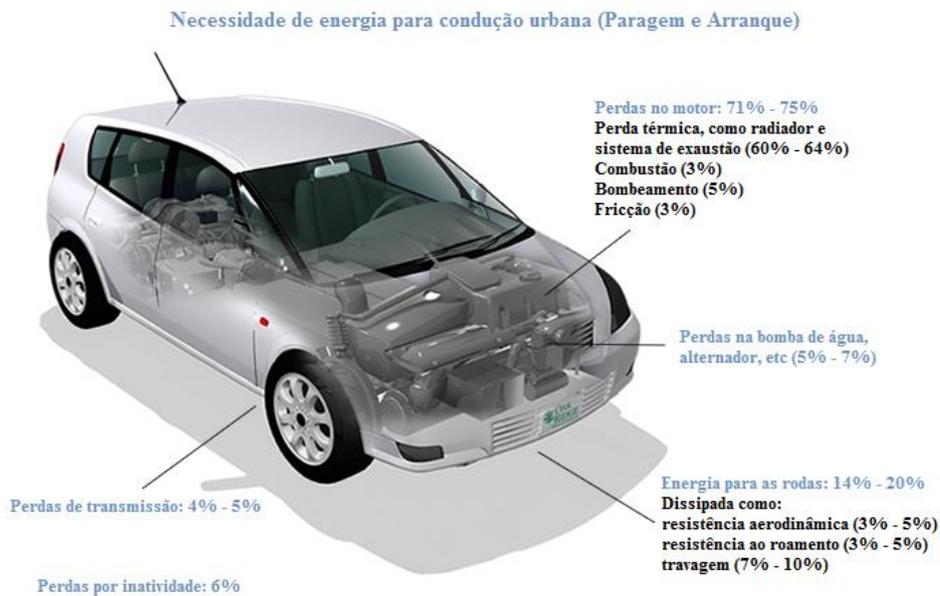


Figura 2.19 – Perdas de energia num modelo de veículo de passageiros, em condução urbana (Adaptado de USDE (2014))

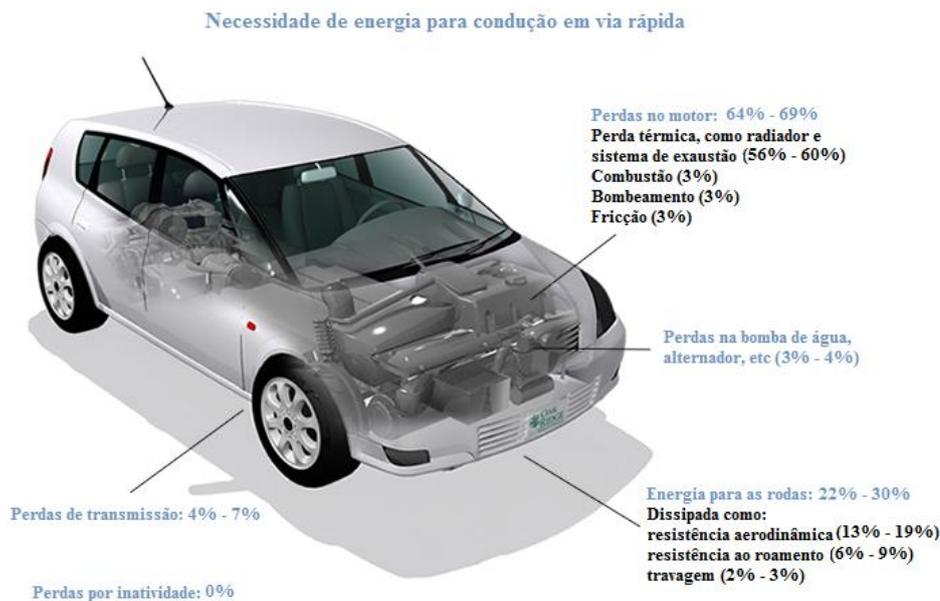


Figura 2.20 – Perdas de energia num modelo de veículo de passageiros, em condução em via rápida (Adaptado de USDE (2014))

Nos veículos convencionais, cerca de 14% a 30% da energia derivada do combustível é despendida na movimentação na estrada. A restante energia perde-se no motor, na transmissão, nas rodas, entre outros (USDE, 2014). Em comparação, na Figura 2.21 e na Figura 2.22 representam-se as perdas de energia também em diferentes cenários de condução, mas para um veículo híbrido.

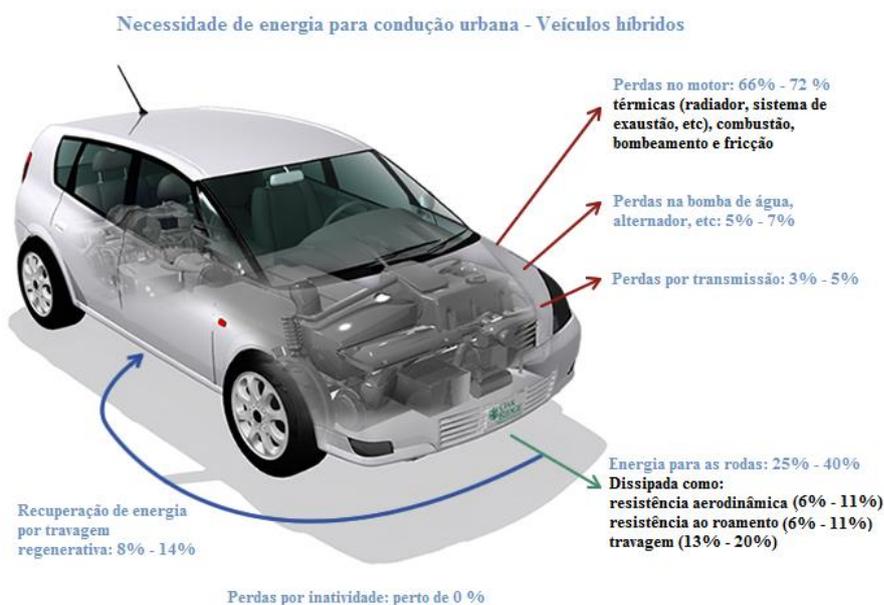


Figura 2.21 – Perdas de energia num modelo de veículo híbrido de passageiros, em condução em via urbana (Adaptado de USDE (2014))

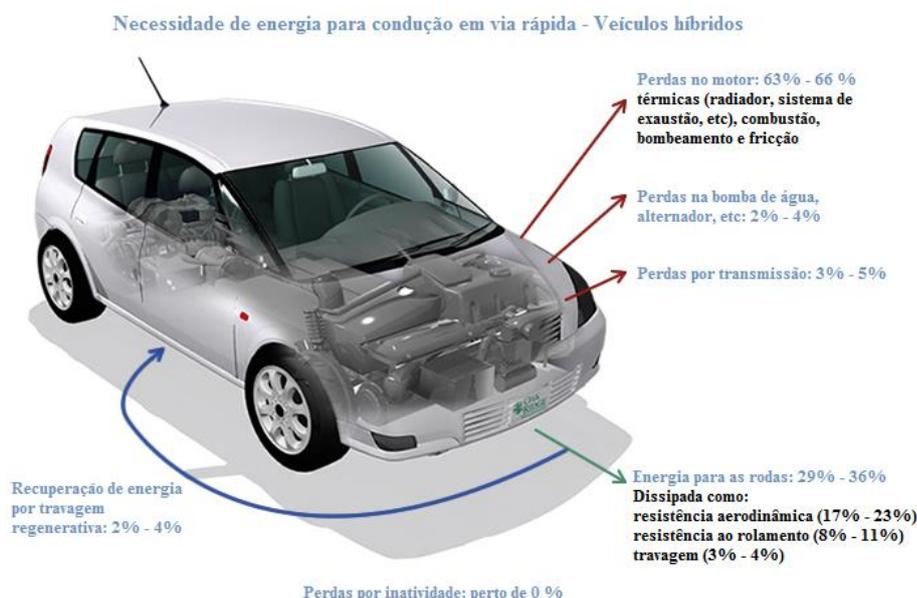


Figura 2.22 – Perdas de energia num modelo de veículo híbrido de passageiros, em condução em via rápida (Adaptado de USDE (2014))

Cerca de 25% a 40% da energia derivada do combustível introduzido no híbrido é usada para a movimentação na estrada. Os híbridos são mais eficientes comparativamente aos veículos convencionais, especialmente nos casos de paragem e arranque, no uso da regeneração da travagem, motor elétrico e assistência ao condutor (USDE, 2014).

## **2.5 Influência da resistência ao rolamento nos consumos de combustível**

O interesse dos consumidores e do governo na economia dos combustíveis foi estimulado durante meados dos anos setenta em resposta à subida de preços dos combustíveis impostos pela Organização dos Países Exportadores de Petróleo. Como os preços da gasolina subiram mais de 25 % em meses, motoristas e políticos começaram a concentrar-se no papel dos combustíveis na poluição e acumulação de dióxido de carbono atmosférico e outros gases de estufa (Menzies e Zucchetto, 2006).

Existem várias maneiras para aumentar a economia de combustível de um veículo. Entre elas está a redução das cargas que devem ser suportadas pelo veículo e aumentar a eficiência do seu motor, da sua transmissão, e outros componentes que geram e transferem energia para os eixos. De acordo com Menzies e Zucchetto (2006), num cenário de condução urbana, apenas 10 % a 15 % da energia de combustível é transmitida como energia para as rodas. Uma vez que as perdas em espera são menores durante a condução em via rápida e que o motor está a funcionar de forma mais eficiente, isto é, constante, uma percentagem maior de combustível e energia, cerca de 20 %, é transmitida para as rodas.

Tanto para condução urbana como para condução em via rápida, a energia mecânica necessária no movimento do veículo é influenciada pela resistência aerodinâmica, inércia do veículo, resistências internas do motor e sistema de transmissão e resistência ao rolamento (Bendtsen, 2004). A resistência aerodinâmica consome relativamente mais energia durante a condução em via rápida dado que a força da resistência aumenta com a velocidade do veículo. Em comparação, as perdas de energia por resistência ao rolamento, para um dado veículo e conjunto de pneus, são principalmente em função da distância percorrida (Menzies e Zucchetto, 2006). Estes fatores contribuem para o aumento de energia necessária pelo veículo e todos eles possuem uma importância decisiva nos mais diversos cenários de condução (Bendtsen, 2004).

As condições climáticas podem também influenciar a resistência ao rolamento e até mesmo causar perdas na transmissão do veículo.

São, portanto, diversos os fatores que influenciam os consumos de combustível de um veículo em movimento. Um veículo em movimento está sujeito a várias forças que podem facilitar ou dificultar o seu movimento, como por exemplo as condições climáticas, nomeadamente a direção e velocidade do vento. De modo sucinto, a maior parte dos fatores que influenciam o consumo do veículo está relacionada com aspetos técnicos do veículo, nomeadamente as características dos pneus e aspetos relacionados com a superfície do pavimento. Mas não são só estes aspetos que influenciam o consumo do veículo. De acordo com (Hammarstrom *et al.*, 2009), condições climáticas como a temperatura do ar e a pressão atmosférica podem mesmo influenciar a resistência ao rolamento e as perdas na transmissão do veículo.

A resistência ao rolamento tem uma influência direta no consumo energético, pelo que a sua redução resulta numa diminuição da energia mecânica exigida ao motor e por sua vez a quantidade de combustível consumida pelo mesmo (Menzies e Zucchetto, 2006).

Apesar dos estudos de alguns autores apresentarem valores concretos quando relacionam a resistência ao rolamento com o consumo energético, não é possível concluir que existe uma relação fundamental que possa converter o coeficiente de resistência ao rolamento com o consumo de combustível do veículo, pois este pode ser influenciado por muitos fatores (Sandberg e Ejsmont, 2002).

Segundo Menzies e Zucchetto (2006), a redução no consumo de combustível resultante da alteração da resistência ao rolamento em 10% tem a designação de “fator de retorno” e a redução pode variar entre 2 a 3% do consumo de combustível.

A União Europeia criou um programa apelidado de “*Leonardo da Vinci*” cujo objetivo era a definição de um ciclo de condução especial representativo da condução em meio urbano e em vias rápidas. Este programa pretendia a elaboração de uma aprovação sistemática relativamente à poluição emitida pelos novos veículos. De outro modo, este sistema pode também ser usado para estimar a influência média da resistência ao rolamento em função dos diferentes pavimentos e diferentes tipologias de pneus.

Em Bendtsen (2004) é referido que no estudo considerado para dez comportamentos de condução diferentes se depreendeu que a resistência ao rolamento influencia em 14 % todos os fatores que afetam o consumo de energia. Então, foi possível obter o efeito na energia consumida, em percentagem, através da relação entre a resistência ao rolamento e o consumo de energia, ambos expressos em percentagem. De acordo com o resultado obtido foi possível verificar que não existe uma linearidade na relação, porém, neste estudo de testes de emissões de poluentes da União Europeia, averiguou-se que há um crescimento linear do consumo de combustível à medida que o coeficiente de resistência ao rolamento dos vários pneus utilizados também aumenta (Sandberg e Ejsmont, 2002).

Sabe-se que o próprio veículo, o tipo de pneu, os efeitos aerodinâmicos e o comportamento do condutor interferem no consumo energético, mas outro fator muito importante como já se referiu é a textura e composição do pavimento. De acordo com (IGGA, 2014), a escolha do método de reabilitação dos pavimentos pode salvaguardar o consumo de combustível e reduzir a dependência na importação do petróleo. Cada vez mais há preocupação sobre a conservação de energia, a eficiência de combustível dos veículos e novas alternativas como os veículos híbridos e o biodiesel.

### **3 MATERIAIS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS**

#### **3.1 Introdução**

O presente capítulo tem como objetivo definir os materiais e métodos experimentais utilizados ao longo do trabalho apresentado nesta dissertação, assim como os procedimentos para a produção de misturas betuminosas e a metodologia usada no ensaio de avaliação da resistência ao rolamento e consequente determinação dos consumos energéticos.

No que diz respeito aos materiais usados nos ensaios iniciais, Subcapítulo 3.2, estes materiais foram selecionados quanto ao seu possível impacto nos consumos energéticos. O objetivo dos ensaios preliminares é identificar se existe alguma tendência e relação entre peso/rugosidade/rigidez/altura do dia, e a metodologia é a mesma utilizada no ensaio desenvolvido para avaliação da resistência ao rolamento. Aliado ao referido, neste subcapítulo menciona-se o motivo da escolha dos materiais e sua utilização para posterior comparação com as misturas betuminosas e lajes graníticas a utilizar.

No Subcapítulo 3.3 são descritas as características superficiais de lajetas graníticas com diferentes características superficiais, preparadas especificamente para este estudo, explicando a razão das rugosidades adotadas.

Relativamente à formulação e produção de misturas betuminosas, Subcapítulo 3.4, enumera-se toda a metodologia de produção das misturas, tais como: curva granulométrica dos agregados, percentagem de betume e temperatura de mistura e compactação. Dado que os parâmetros a estudar se baseiam na rigidez do pavimento e na respetiva rugosidade, optou-se pela possibilidade de se obter duas misturas betuminosas com módulo de deformabilidade diferente e rugosidades superficiais distintas, isto é, diferentes profundidades médias de textura.

O Subcapítulo 3.5 é referente à caracterização dos betumes utilizados na produção das misturas betuminosas, através do ensaio de penetração e através do ensaio de ponto de amolecimento pelo método do anel e bola.

A caracterização superficial das misturas betuminosas, isto é, a textura, é descrita no Subcapítulo 3.6, onde também refere a metodologia do ensaio utilizado para o efeito, ensaio da mancha de areia.

Quanto ao ensaio desenvolvido para avaliação da resistência ao rolamento, Subcapítulo 3.7, descreve-se a metodologia adotada, a recolha e tratamentos dos dados e o método de análise dos dados recolhidos. O ensaio é constituído por um mecanismo composto por uma roda que rola sobre a superfície do pavimento, granítico ou betuminoso, com principal enfoque na rugosidade (macrotextura) e no módulo de deformabilidade das misturas. Numa situação real, o mecanismo pretende representar o movimento de um veículo automóvel, porém, o estudo fundamenta-se na avaliação do consumo de energia elétrica necessário ao movimento da roda pneumática sobre as diferentes superfícies através do ensaio de pista (*Wheel Tracking Test*). Tal como numa situação real, o mecanismo pretende representar a resistência ao rolamento que se verifica entre o pneu do veículo e a superfície do pavimento estando associado um determinado consumo de combustível.

O Subcapítulo 3.8 descreve o modo como a influência da temperatura, da pressão e da velocidade têm nos consumos energéticos, e por último, o Subcapítulo 3.9 trata da descrição e caracterização do pneu utilizado, bem como a sua rigidez.

### **3.2 Caracterização dos materiais utilizados nos ensaios iniciais**

A caracterização dos materiais utilizados é importante para compreender a sua influência nos consumos energéticos. Foram escolhidos materiais cujas características se evidenciassem na rigidez e na textura por forma a poder estudar separadamente cada uma destas propriedades. Com os dados recolhidos pretendia-se confirmar as tendências esperadas e contribuir para um maior nível de sustentabilidade do estudo.

Utilizou-se um material de textura muito reduzida (superfície lisa) para servir de referência e uma tendência esperada é relativa ao peso, uma vez que quanto mais pesado for o material a ensaiar, maior será o consumo energético do equipamento (no equipamento utilizado o consumo de energia do motor está associado ao movimento vaivém da mesa que suporta a lajeta, por baixo da roda).

Outro fator tido em conta nos ensaios iniciais foi o período do dia em que foi realizado, isto é, diferentes horas, que desde já se pode dizer que não influenciou os resultados. Não só nestes ensaios mas também nos ensaios realizados às lajes graníticas e às lajes betuminosas, foi tida em conta a pressão, expressa em bar, da roda pneumática, sendo mais uma tendência a averiguar.

Todos os ensaios decorreram a uma velocidade de 0,848 Hz, com duração de duas horas e com controlo da temperatura a 22 °C, onde se registou uma diferença máxima de 3,19 °C.

### 3.2.1 Placa lisa

A superfície lisa escolhida foi uma placa de madeira (Figura 3.1) cujo peso é de 1,0295 kg. O facto de se tratar de uma madeira aleatoriamente selecionada no laboratório, o seu módulo de rigidez é desconhecido, sendo que os ensaios efetuados com esta placa não podem ser avaliados em função da rigidez.

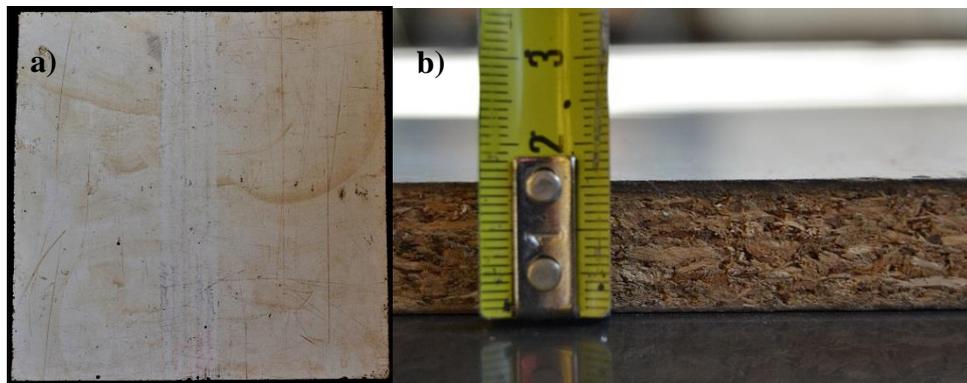


Figura 3.1 – Ensaio realizado sobre uma placa de madeira de superfície lisa: a) Vista superior da placa; b) Espessura da placa

Numa primeira fase, os ensaios foram realizados havendo contacto entre a roda e o pavimento. Foram impostas três diferentes pressões na roda: 3,0 bar, 2,0 bar e 1,5 bar, em que para cada uma das pressões se efetuou um ensaio sem o peso adicional do ensaio de pista (18,05 kg) e posteriormente outro ensaio com o respetivo peso.

A segunda fase diferencia-se pela ausência de contacto pneu-pavimento, sendo apenas avaliado o consumo energético consoante o peso da placa.

### 3.2.2 Influência de diferentes pesos nos consumos

Para avaliar a influência do peso sobre a mesa utilizaram-se vários pesos de forma a determinar se existe uma tendência linear, ou seja, se um aumento constante do peso gera um consumo constante de energia.

Definiu-se como valor de referência dos consumos energéticos, apenas o movimento da mesa do ensaio de pista, sem qualquer peso sobre ela e sem contacto com a roda. Cada incremento de peso deve gerar um valor superior ao de referência.

A velocidade de ensaio nos vários testes com diferentes pesos é 0,848 Hz. Os pesos utilizados foram 1,03 Kg, 5,00 Kg, 5,56 Kg, 8,21 Kg, 8,59 Kg, 10,46 Kg, 20,38 Kg e 40,64 Kg.

### 3.3 Caracterização de diferentes superfícies

A propósito de avaliar os consumos energéticos numa situação de circulação em pavimento rígido, foram utilizadas duas lajetas de granito, cujo módulo de elasticidade varia de aproximadamente 30 a 50 GPa (valores da mesma ordem de grandeza dos pavimentos rígidos).

As lajetas têm a particularidade de as faces opostas serem de diferentes texturas. Uma é composta por uma face de textura reduzida, lisa, e a face oposta rugosa, e um peso de 10,4595 Kg (Figura 3.2).

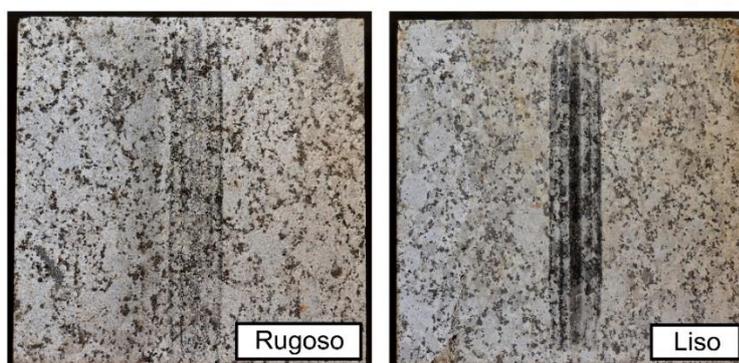


Figura 3.2 – Lajeta granítica com face de textura lisa e face rugosa

A outra lajeta, com um peso de 9,919 Kg, deriva da aplicação de rasgos na superfície das lajetas (de forma a simular a ranhuragem dos pavimentos rígidos). Foram utilizados dois espaçamentos entre rasgos diferentes, um para cada face, e com direções opostas para não criar zonas de provável fragilidade (Figura 3.3). Na Figura 3.4 e na Figura 3.5 estão representadas cada face da lajeta e um detalhe lateral dos rasgos bem como o espaçamento adotado.



Figura 3.3 – Lajeta com espaçamentos diferentes em faces e direção opostas

Este tipo de rasgos nos pavimentos são aplicados geralmente longitudinalmente ao sentido da corrente de tráfego, porém, não se pode aplicar nos ensaios em laboratório pois o espaçamento está de acordo com o que é aplicado na realidade mas a roda pneumática utilizada no ensaio não representa a realidade. Optou-se então por usar a direção dos rasgos no sentido transversal ao movimento da roda.

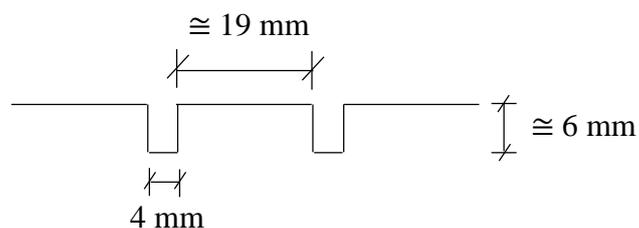


Figura 3.4 – Lajeta com textura ranhurada com maior espaçamento: a) Superfície e b) Pormenor dos rasgos e respetivas dimensões

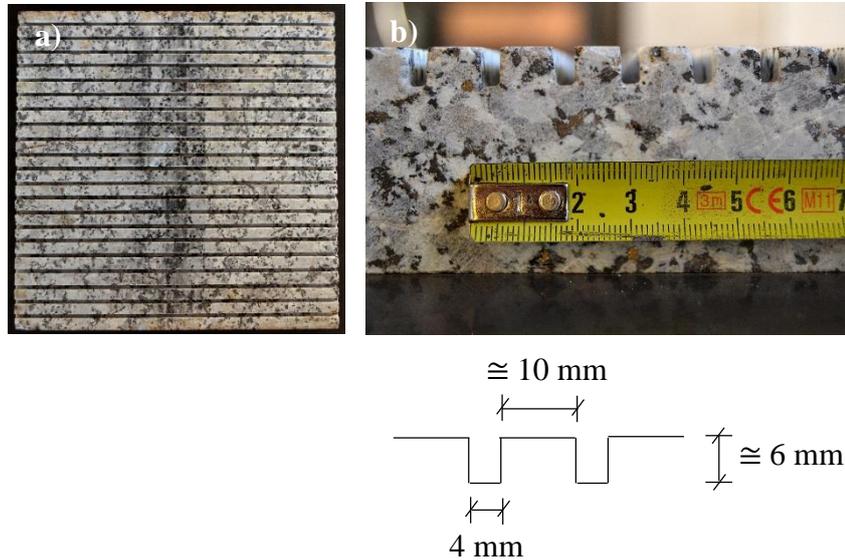


Figura 3.5 – Lajeta com textura ranhurada com menor espaçamento. a) Superfície e b) Pormenor dos rasgos e respetivas dimensões

Estas quatro diferentes superfícies foram ensaiadas tendo em conta a temperatura ambiente, a velocidade, a pressão no pneu e a carga total transmitida ao pavimento.

### 3.4 Formulação e produção das misturas betuminosas

Com os propósitos definidos anteriormente, as duas misturas betuminosas utilizadas neste estudo, ambas definidas pelo Caderno de Encargos (CE) da Estradas de Portugal (Estradas de Portugal, 2009), foram uma mistura de betão betuminoso para camada de desgaste (AC 14 surf BB Styrelf) e uma mistura porosa (PA 14 35/50).

Cada mistura tem as suas especificidades, nomeadamente as temperaturas de produção e compactação, a percentagem de betume, a composição granulométrica e as características dos agregados naturais. A nomenclatura destas misturas será enunciada neste estudo como AC 14 e PA 14.

A formulação das misturas betuminosas em laboratório, isto é, a determinação da percentagem ótima em betume, no âmbito da norma NP EN 13108-1 (betão betuminoso) deve ser efetuada tendo por base o método de Marshall (EN 12967-34). Porém, o teor em betume foi definido com base em trabalhos realizados anteriormente para misturas betuminosas, optando-se por um teor de 5% para ambas as misturas estudadas.

A principal função dos agregados é assegurar a resistência mecânica na estrutura do pavimento. É necessário que os agregados estejam limpos, livres de impurezas como argilas ou materiais orgânicos, e as partículas devem ser cúbicas. Caso os agregados não estejam suficientemente limpos, o atrito entre grãos diminuirá e dificultará o envolvimento do ligante.

Relativamente às características dos agregados naturais que compõem as misturas, estas são discriminadas no Caderno de Encargos (CE) da Estradas de Portugal (2009), cujas frações dos agregados e fíler utilizados no presente estudo são compostas pelas seguintes dimensões nominais: 6/14 mm, 4/8 mm, 4/6 mm, pó 0/4 mm e fíler comercial.

De acordo com a norma EN 933-1 foi realizada a análise granulométrica dos diferentes agregados, cuja apresentação se encontra na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Análise granulométrica dos agregados utilizados (norma EN 933-1)

Peneiro (mm)	Brita 6/14	Brita 4/10	Brita 4/6	Pó 0/4	Fíler
22,4	100	100	100	100	100
20,0	100	100	100	100	100
16,0	99	100	100	100	100
14,0	92	100	100	100	100
12,5	74	100	100	100	100
10,0	40	97	100	100	100
6,3	6	34	96	100	100
4,0	2	4	11	94	100
2,0	2	2	4	73	100
0,5	1	2	3	39	100
0,125	1	1	2	17	99
0,063	0	1	1	11	92

A formulação da mistura AC 14 Styrelf que foi realizada com base no fuso granulométrico especificado no anexo nacional da norma NP EN 13108-1, resultou na composição apresentada

na Tabela 3.2. Os fusos granulométricos funcionam como limite inferior e superior e a curva granulométrica do material em estudo deve estar compreendida dentro desses valores. Deste modo, é possível ter maior garantia de que o material selecionado se comportará como o esperado. Na Figura 3.6 está representada a curva granulométrica do material usado na mistura.

Tabela 3.2 – Quantidade de material usado na mistura betuminosa AC 14

Material	Pó 0/4	Brita 4/8	Brita 6/14	Filer calcário
Quantidade (%)	41	12	44	3

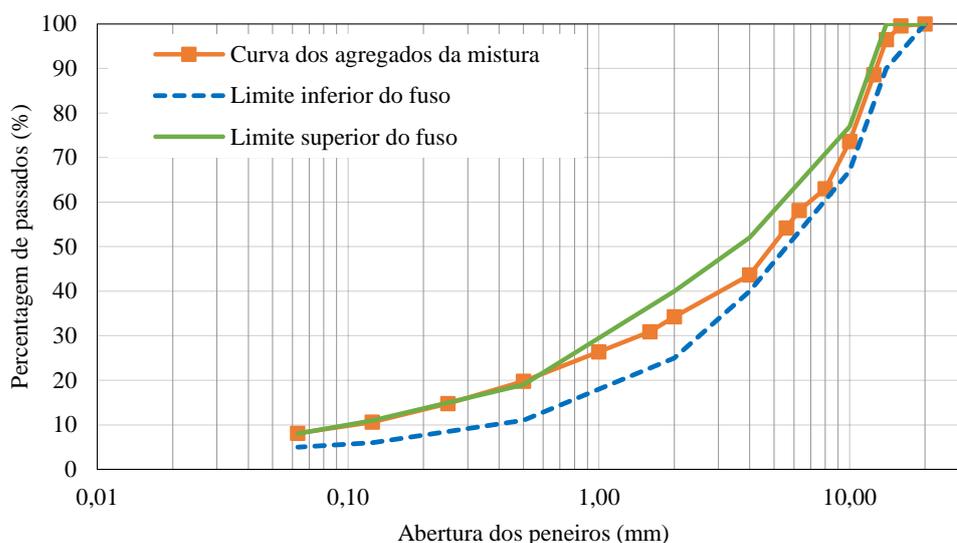


Figura 3.6 – Curva granulométrica da mistura de agregados das misturas estudadas e respetivo fuso para misturas AC 14 Surf

A composição granulométrica da mistura PA 14 está representada na Tabela 3.3 e na Figura 3.7 apresenta-se a respetiva curva granulométrica do material.

Tabela 3.3 – Quantidade de material usado na mistura betuminosa PA 14

Material	Pó 0/4	Brita 4/6	Brita 6/14	Filer calcário
Quantidade (%)	18	20	60	2

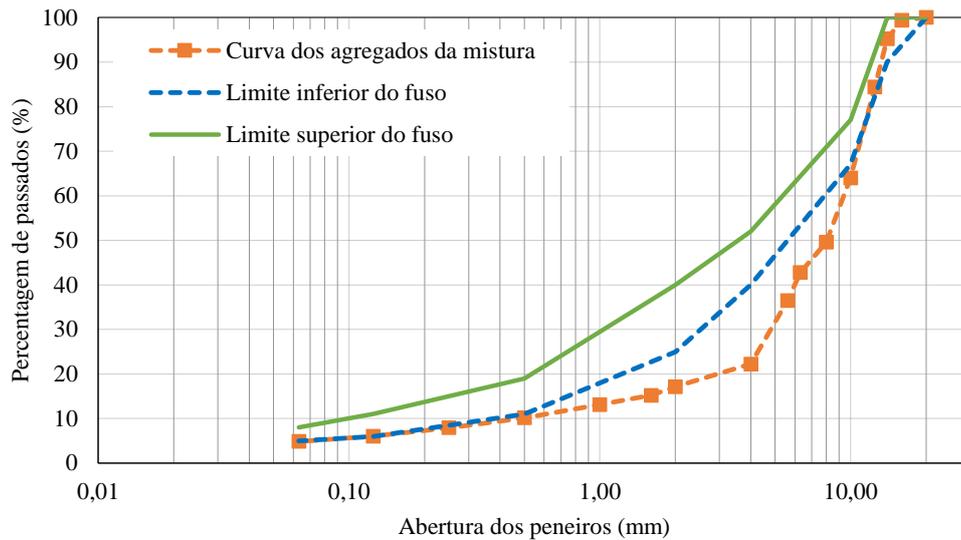


Figura 3.7 – Curva granulométrica da mistura de agregados das misturas estudadas e respetivo fuso para a mistura PA 14

O betume é aquecido num equipamento apropriado para depois ser adicionado aos agregados no misturador. Para ambos os betumes a temperatura definida foi de 165 °C (norma EN 12697-35). Após a mistura dos agregados e do betume estar feita procede-se à compactação com um cilindro de rastos lisos num molde cuja espessura é de 4 cm.

Figura 3.8 esquematiza o processo de produção das misturas betuminosas após a pesagem das quantidades dos agregados, previamente aquecidos a 180 °C, cuja numeração representa:

1. Aquecimento do betume
2. Mistura do betume com os agregados no misturador
3. Colocação e espalhamento da amassadura no molde
4. Preparação para a compactação
5. Registo da temperatura de compactação
6. Aspeto final da laje após compactação

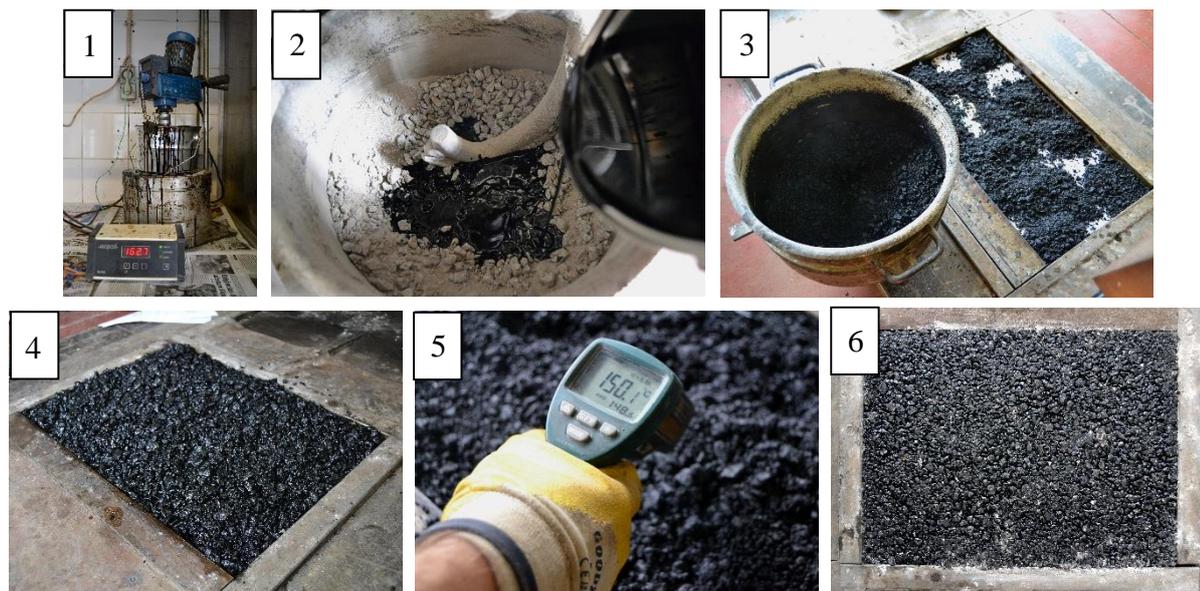


Figura 3.8 – Esquemática do processo de produção de misturas betuminosas

### 3.5 Caracterização dos betumes

Os ensaios de caracterização dos betumes utilizados na produção das misturas betuminosas, nomeadamente o betume convencional 35/50 da Cepsa (betume corrente na pavimentação rodoviária devido ao baixo valor de penetração) e Styrelf, (betume modificado comercial) foram os seguintes:

- Ensaio de penetração (EN1426);
- Ensaio de Temperatura de Amolecimento pelo método anel e bola (EN 1427).

#### 3.5.1 Ensaio de Penetração a 25 °C

O Ensaio de Penetração, de acordo com a norma EN 1426, consiste na penetração de uma agulha de 100 g numa amostra de betume, durante 5 segundos, a uma temperatura de 25 °C. O valor de penetração é dado pela distância que a agulha penetrou no betume, em décimos de milímetro (Figura 3.9). Este ensaio permite determinar a consistência do betume, bem como obter a sua classificação para temperaturas de serviço, nomeadamente a 25 °C.



Figura 3.9 – Ensaio de Penetração a 25 °C com agulha

### 3.5.2 Ensaio de Temperatura de Amolecimento

O Ensaio de determinação da Temperatura de Amolecimento, Figura 3.10, indica a temperatura à qual o betume sofre uma mudança de fase que reduz rapidamente a sua resistência à deformação, isto é, quando o betume começa a tornar-se líquido. Portanto, este ensaio dá a indicação da melhoria à suscetibilidade térmica do betume.

De acordo com a norma EN 1427, este ensaio é realizado segundo o método do anel e bola, e consiste na colocação de uma amostra de betume em dois anéis, que após o arrefecimento são colocados num recipiente com um fluido, água ou glicerina (a glicerina para temperaturas de anel e bola superiores a 80 °C). Em seguida, uma bola de aço com aproximadamente 3,5 g de peso é colocada em cima de cada amostra e o fluido é aquecido a uma taxa de 5 °C/min até o betume se tornar líquido e a bola atingir a base do prato. A temperatura de amolecimento do betume em estudo é portanto a temperatura a que a bola atinge a base do prato.



Figura 3.10 – Ensaio de determinação da Temperatura de Amolecimento

### 3.6 Caracterização superficial das misturas betuminosas

A superfície dos pavimentos rodoviários é fundamental para a aderência dos pneus quando expostos às diversas condições climáticas bem como pelos fenómenos derivados do contacto da borracha do pneu com a superfície. A superfície deve ser capaz de escoar a água das chuvas para que fenómenos como aquaplanagem possam ser evitados.

Os ensaios de caracterização superficial surgem na medida de analisar as características da textura da superfície. O ensaio realizado nesta dissertação foi o da mancha de areia (macrotextura).

#### 3.6.1 Mancha de areia

A superfície da laje deve estar seca e limpa, pois o ensaio caracteriza a superfície do pavimento quanto à sua capacidade de drenar a água confinada entre o pneu e o pavimento e quantifica a distância média entre os grãos individuais de agregados da superfície.

Um determinado volume de areia é vertido sobre o pavimento e utilizando uma base de borracha vai-se espalhando gradualmente em movimentos circulares até a área da mancha de areia não aumentar. A EN 13036-1 já preconiza a utilização de esferas vidro em vez da areia fina. Mede-se o diâmetro da mancha de areia e sabendo o volume inicial é possível calcular a espessura média da mancha através da Equação 1. O resultado (profundidade média da textura superficial, PMT) é expresso em mm.

$$PMT = \frac{4V}{D^2\pi} \quad (1)$$

onde:

V – volume de esferas de vidro espalhado (mm<sup>3</sup>);

D – diâmetro médio do círculo obtido com o espalhamento.

Após o espalhamento mede-se a mancha em 4 diâmetros representativos e determina-se a média. No caso do presente estudo definiram-se duas zonas opostas da laje para se obter maior

representatividade da laje, pois a sua superfície pode não ser homogênea (Figura 3.11). O volume de esferas de vidro utilizado foi de 56259,64 mm<sup>3</sup>.

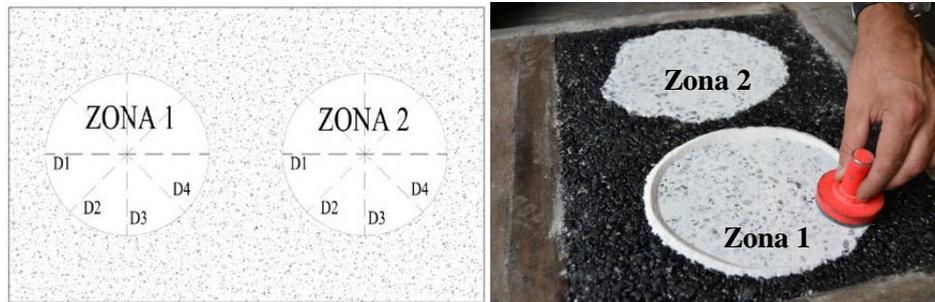


Figura 3.11 – Aplicação do método do ensaio da mancha de areia

### 3.7 Ensaio para avaliação da resistência ao rolamento

Para registrar os consumos obtidos aquando a realização dos ensaios de pista foi utilizado um equipamento de leitura de consumos elétricos. Antes de serem realizados ensaios nas misturas betuminosas e nas lajes de granito, foram realizados ensaios iniciais em materiais com diferentes tipologias para se averiguar se as variáveis em estudo se destacavam e para obter maior consistência nos resultados.

#### 3.7.1 Metodologia adotada

Usualmente, o equipamento do ensaio de pista, ou *Wheel Tracking Test*, é utilizado para avaliação da deformação permanente nos diversos pavimentos rodoviários sob a ação de uma roda carregada que se desloca sobre a sua superfície. A deformação é função do número de passagens, ou ciclos, de uma roda normalizada, da frequência de passagem e da temperatura local. No presente caso de estudo, este equipamento foi utilizado para medição da energia elétrica e consequente consumo energético relativo à resistência ao rolamento.

Optou-se pela troca da roda rígida pertencente ao ensaio de pista por uma roda pneumática com o objetivo de se aparentar a uma situação real com diferentes níveis de pressão do ar interior. A mesa de suporte aos provetes para ensaio desloca-se segundo um eixo horizontal e movimenta-se repetidamente para trás e para a frente, perfazendo uma totalidade de

23 centímetros em cada passagem. Uma vez que a roda se move na horizontal, está impedida de movimentos laterais e é livre de movimento na vertical, podem ser registradas as irregularidades na superfície do material bem como deformações e obliquidades existentes.

Comprovado que o efeito de histerese que ocorre no pneu aumenta quanto maior for a carga aplicada à roda, pois esta carga contribui para uma maior deformação e a relação entre a resistência ao rolamento e a deflexão das paredes laterais devido à carga aplicada é aproximadamente linear (Menzies e Zucchetto, 2006), então a resistência ao rolamento é aproximadamente proporcional à carga aplicada.

Grande parte dos ensaios foi realizada de duas formas:

- Uma em que a carga transmitida à lajeta é o próprio peso da roda (Figura 3.12);
- Outra em que é adicionada uma carga de aproximadamente 18 kg (Figura 3.13).

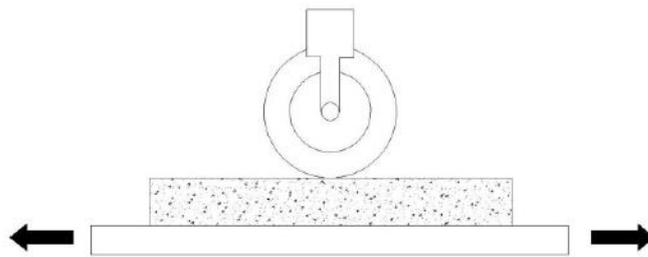


Figura 3.12 – Representação do ensaio de pista sem carga complementar

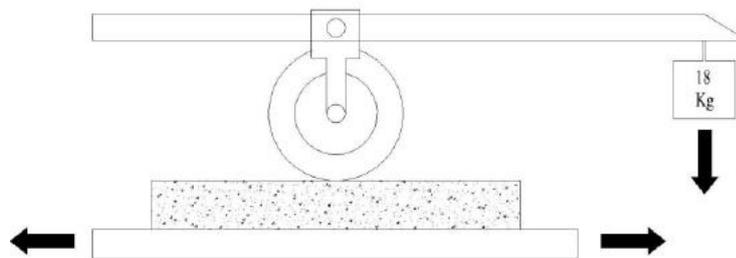


Figura 3.13 – Representação do ensaio de pista com carga complementar

Na Figura 3.14 está representado o equipamento do ensaio de pista com a roda pneumática aquando da realização de um ensaio nas lajes de granito com o peso adicional e controlo da temperatura.



Figura 3.14 – Equipamento do ensaio de pista com roda pneumática: a) Com carga adicional e b) Pormenor do percurso da roda sobre a superfície

Entende-se por ciclo o movimento de vaivém com determinada frequência, em Hz, durante um certo período de tempo, em segundos.

A temperatura ambiente foi registada com o apoio de um sensor instalado no interior do equipamento. Tendo em atenção a abertura da porta do respetivo equipamento, o controlo da temperatura deveu-se ao sistema de ar condicionado do laboratório e noutros ensaios com o auxílio de um sistema de controlo de temperatura (Figura 3.15). Também o movimento da mesa foi registado através de um potenciómetro para ser possível avaliar a posição da laje durante o ensaio e determinar a área de contacto do pneu/pavimento.



Figura 3.15 – Sistema de controlo de temperatura

A rede, fonte de energia do equipamento, fornece energia diretamente a um multímetro (Figura 3.17) para que este registre os dados eletrônicos, nomeadamente o consumo elétrico que passa para o motor do equipamento do ensaio de pista. Este motor é controlado no computador por meio de uma placa de aquisição de dados (Figura 3.18) onde é armazenada a informação. A Figura 3.16 representa o esquema de emparelhamento dos equipamentos utilizados para a aquisição de dados.

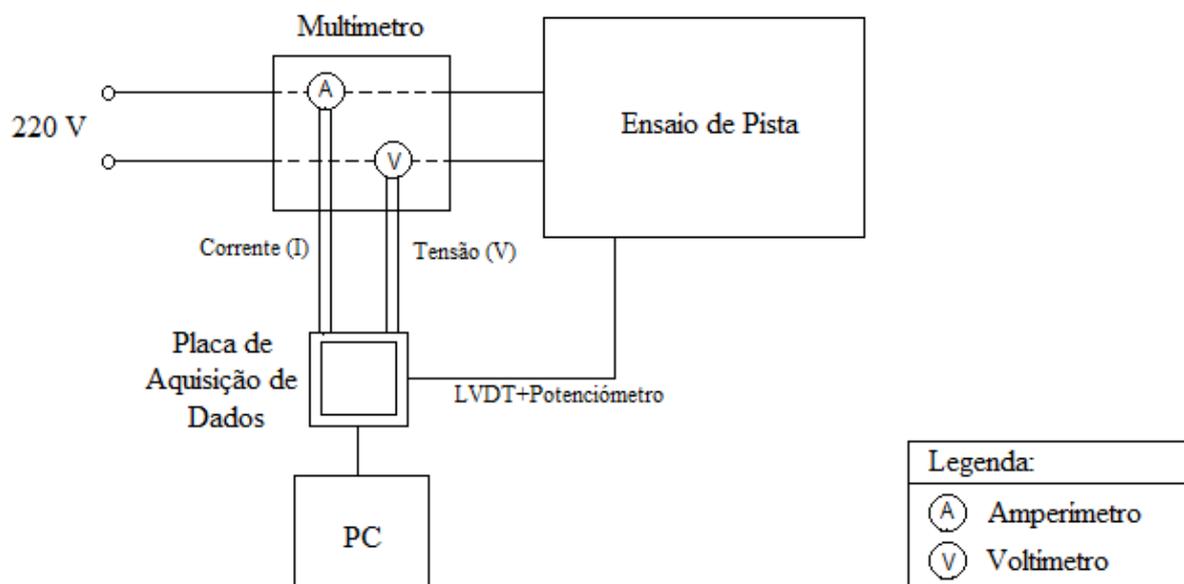


Figura 3.16 – Esquema do emparelhamento de equipamentos utilizados no ensaio de avaliação de consumos energéticos



Figura 3.17 – Multímetro utilizado no ensaio de avaliação de consumos energético



Figura 3.18 – Placa de aquisição de dados utilizada no ensaio de avaliação de consumos energéticos

### 3.7.2 Leitura e tratamento de dados

Entende-se por intensidade da corrente a quantidade de eletricidade que passa numa determinada secção de um condutor numa unidade de tempo. A tensão elétrica representa a diferença de potencial elétrico entre 2 pontos de um circuito elétrico.

No *software* ajustou-se para cada onda sinusoidal da tensão e da intensidade um registo de 40 leituras. Ambas as ondas possuem valores positivos e valores negativos os quais definem um ciclo elétrico (Figura 3.19). Cada onda sinusoidal tem um intervalo de 0,02 segundos, pois a corrente alternada pública é de 50 Hz.

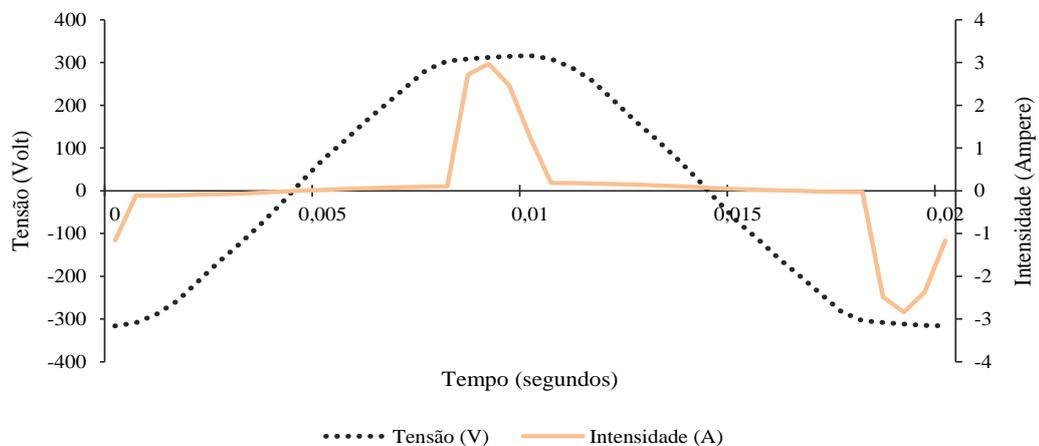


Figura 3.19 – Curva sinusoidal típica de um ciclo elétrico.

O *software* que permite o registo dos dados foi desenvolvido em *LabView*. Os parâmetros que o *software* foi regulado a registar são:

- Tempo, em segundos;
- Tensão da corrente, em Volt;
- Intensidade da corrente, em Ampere;
- Temperatura, em °C;
- Posição da mesa, em centímetros;
- Energia, em Joule.

Para melhor visualização do *software* e de como se dispõem os parâmetros a registar durante a aquisição de dados, a Figura 3.20, e respetiva legenda, exhibe a disposição destes componentes e os gráficos onde se controlam as ondas sinusoidais da tensão elétrica e da intensidade da corrente, da energia e da posição da mesa. À esquerda dos gráficos da tensão e da intensidade é possível verificar o intervalo de tempo que foi realizado o registo de dados, tendo sido de minuto a minuto, o que equivale a 3000 ciclos (1 minuto).

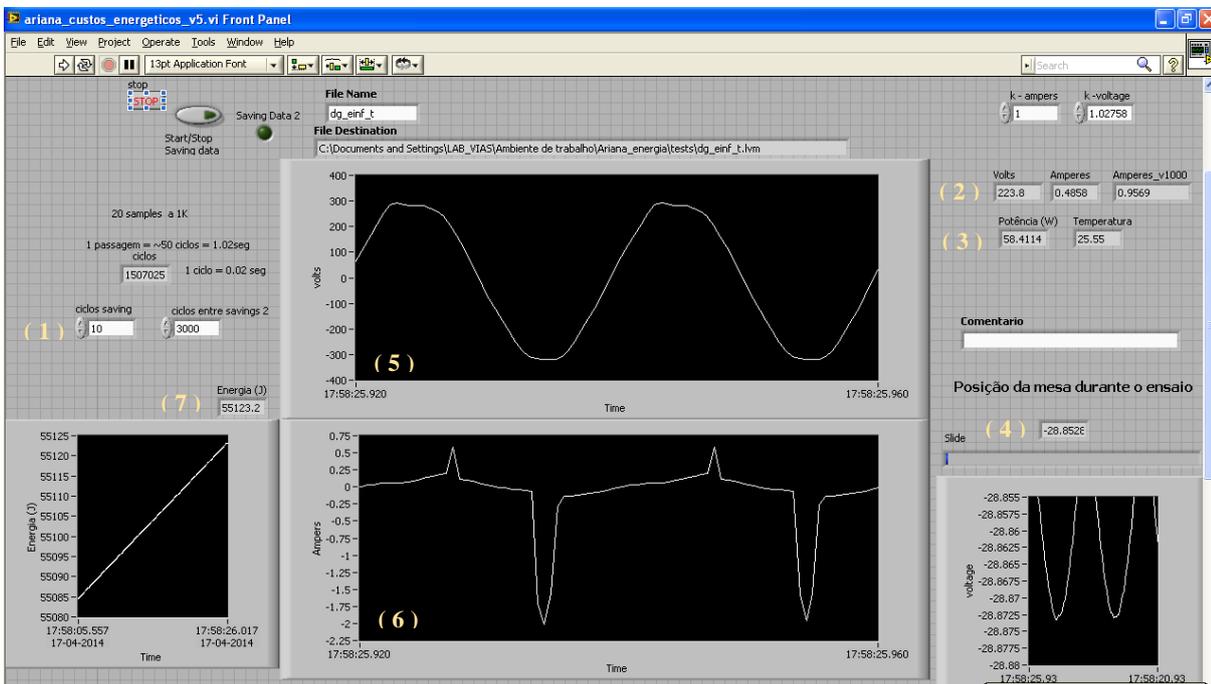


Figura 3.20 – Vista do *software* para aquisição de dados

Legenda da vista do *software*:

1. Definição do registo de dados;
2. Tensão e intensidade instantâneas;
3. Potência calculada pelo método RMS e temperatura instantânea;
4. Posição da mesa durante o ensaio;
5. Gráfico da onda sinusoidal da tensão;
6. Gráfico da onda sinusoidal da intensidade;
7. Registo e gráfico crescente constante da energia consumida.

Ciclo é definido como a parte da onda que não se repete e a frequência, em Hz, é o número de ciclos por segundo.

Para ser possível efetuar a leitura do consumo energético é necessário determinar a potência para cada ciclo. Pode ser expressa em potência aparente, Volt-ampere (VA), ou em Watts (W) que representa a potência real. Uma vez que a potência real produz trabalho e gera calor, considera-se o método mais adequado à quantificação da energia consumida.

Recorre-se ao método *Root Mean Square* (RMS) (Equação 2) para o cálculo da potência.

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{1}{n} \times \sum \text{wave form } (i^2)} \quad (2)$$

Onde:

RMS – valor de ciclo pelo método *Root Mean Square* (VA);

n – número de pontos registados para definir a onda;

i – valor correspondente à onda sinusoidal (volt ou ampere).

No *software* foi imposto o cálculo do RMS para cada onda sinusoidal e a potência resulta da multiplicação dos dois, isto é, o cálculo do RMS da tensão e o do RMS da intensidade da corrente (Equação 3).

$$P = V_{\text{RMS}} \times I_{\text{RMS}} \quad (3)$$

Optou-se por este cálculo e não pelo da potência pelo ciclo médio, pois os resultados da potência e da intensidade instantâneas podem ser menos consistentes do que os determinados pelo método RMS. Assim, em cada ciclo, o *software* está programado para efetuar o cálculo do RMS das 40 leituras e determinar o valor da energia, em Joule, correspondente (Equação 4).

$$\text{Energia} = P \times t(\text{s}) \quad (4)$$

Uma vez que a potência é multiplicada pelo tempo, a energia representa uma linha aproximadamente constante e crescente ao longo do tempo como é visível no gráfico apresentado na Figura 3.21.

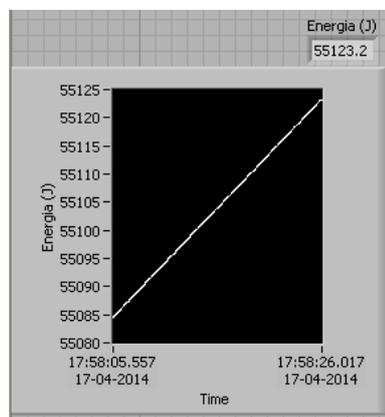


Figura 3.21 – Representação da energia consumida ao longo do tempo

### 3.7.3 Metodologia de análise do ensaio

Para cada minuto de ensaio, o *software* registou 7 segundos de dados, sendo a duração de um ensaio um mínimo de 120 minutos. Os ensaios foram realizados com diferentes períodos de tempo por questões de articulação com os restantes trabalhos no laboratório, portanto foram realizadas estimativas para os ensaios com duração inferior. Assim, foram estabelecidos ensaios com duração de 8, 4 e 2 horas, e o período de análise foi definido de 30 em 30 minutos para se observar o comportamento do consumo energético ao longo do tempo.

No Capítulo 2 foram destacados alguns fatores que têm influência no consumo energético tais como a temperatura do pneu, as irregularidades da superfície e as diferentes condições climáticas, portanto estes parâmetros tiveram especial relevância durante o cumprimento dos

ensaios e no processo de análise. O processo de análise baseou-se num estudo comparativo entre os diferentes materiais, diferentes temperaturas, duas situações de carga transmitida ao pavimento e níveis de pressão do pneu distintos, para verificar se existe uma tendência consoante o parâmetro a avaliar.

Os primeiros ensaios a efetuar foram com o objetivo de apurar se o equipamento do ensaio de pista por si só tem influência nos consumos e se as variáveis como a carga aplicada sobre a mesa e o contacto com a superfície do pneu têm efeito direto no ensaio. Realizaram-se testes onde o contacto da superfície com a roda é inexistente avaliando apenas o predomínio das diferentes cargas sobre a mesa. Outros ensaios tiveram relevo no que diz respeito ao contacto pneu/superfície tendo sido efetuados com diferentes pressões no pneu, com controlo da temperatura média e com duas situações de carga distintas.

Os ensaios nas lajetas betuminosas e nas lajetas graníticas assemelham-se aos de calibração. As análises comparativas baseiam-se na rigidez do material, na textura superficial, na pressão do pneu, na temperatura média controlada, na velocidade da mesa, e na de carga transmitida ao pavimento.

Outro aspeto a ter em conta foi a área de contacto entre o pneu e a superfície para os distintos casos de carga e pressão. A tendência esperada, e que se veio a confirmar, é que a área aumenta com o aumento da carga e com a diminuição da pressão do pneu.

### **3.8 Estudo da influência da temperatura, pressão e velocidade na resistência ao rolamento**

A temperatura é sem dúvida um fator relevante a ter em atenção nos pavimentos rodoviários. O seu aumento faz reduzir o módulo de rigidez das misturas podendo provocar alterações superficiais na macrotextura da zona onde há contacto com o pneu.

Neste trabalho, a principal forma de aquecimento utilizada, além do controlo pelo sistema de ar condicionado do laboratório, foi uma resistência elétrica associada a uma ventoinha. Este sistema convinha não estar conectado ao equipamento WTT para que não houvesse interferência no consumo energético devido à fonte de aquecimento. Na Figura 3.15, referida

no ponto 3.7.1, está representado o sistema utilizado, cujas temperaturas estipuladas para os ensaios foi de 30° C. Foram elaborados outros ensaios com a temperatura média de 22° C, tendo sido controlada pela temperatura ambiente do laboratório e pelo sistema de ar condicionado.

Os ensaios com controlo da temperatura foram conjugados com as diferentes pressões no pneu, com diferentes frequências (velocidades de mesa de 0,848 Hz e 1,064 Hz) e com o emprego ou não da carga adicional de 18 kg do ensaio WTT.

### 3.9 Caracterização da roda pneumática

De forma a poder relacionar as características do pneu com os resultados obtidos, optou-se por verificar a sua constituição e determinou-se a rigidez da borracha.

A rigidez da borracha que compõe o pneu foi medida através de um *Durometer* de escala *Shore A* (Figura 3.22). A escala *Shore* é uma medida da resistência de um material à penetração de uma mola penetradora em forma de agulha. A dureza dos polímeros (borrachas, plásticos) geralmente é medida por estas escalas. *Shore A* é a escala usada para testar elastómeros macios (borrachas) e outros polímeros macios e mede de 0 a 100 HA.

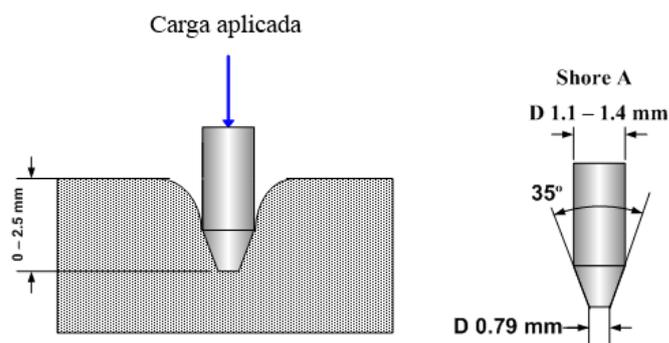


Figura 3.22 – Características do teste *Durometer Shore A*

Assim, mediu-se a dureza do pneu em dois pontos diferentes (Figura 3.23) cuja média é 82,5 HA e se averigua que a borracha do pneu tem elevada rigidez.



Figura 3.23 – Teste da rigidez do pneu: a) Equipamento *Durometer*; b) Medição no ponto 1; c) Medição no ponto 2

Efetuiu-se um corte numa secção de um dos pneus e analisou-se as componentes que o compõem. A Figura 3.24 expõe o corte realizado na roda e mostra o detalhe de algumas partes desta, onde se verifica a existência de um fio na carcaça e 4 arames do talão. Trata-se de um pneu de fraca constituição pois não possui qualquer material mais resistente na carcaça e a almofada de proteção tem pequena espessura.

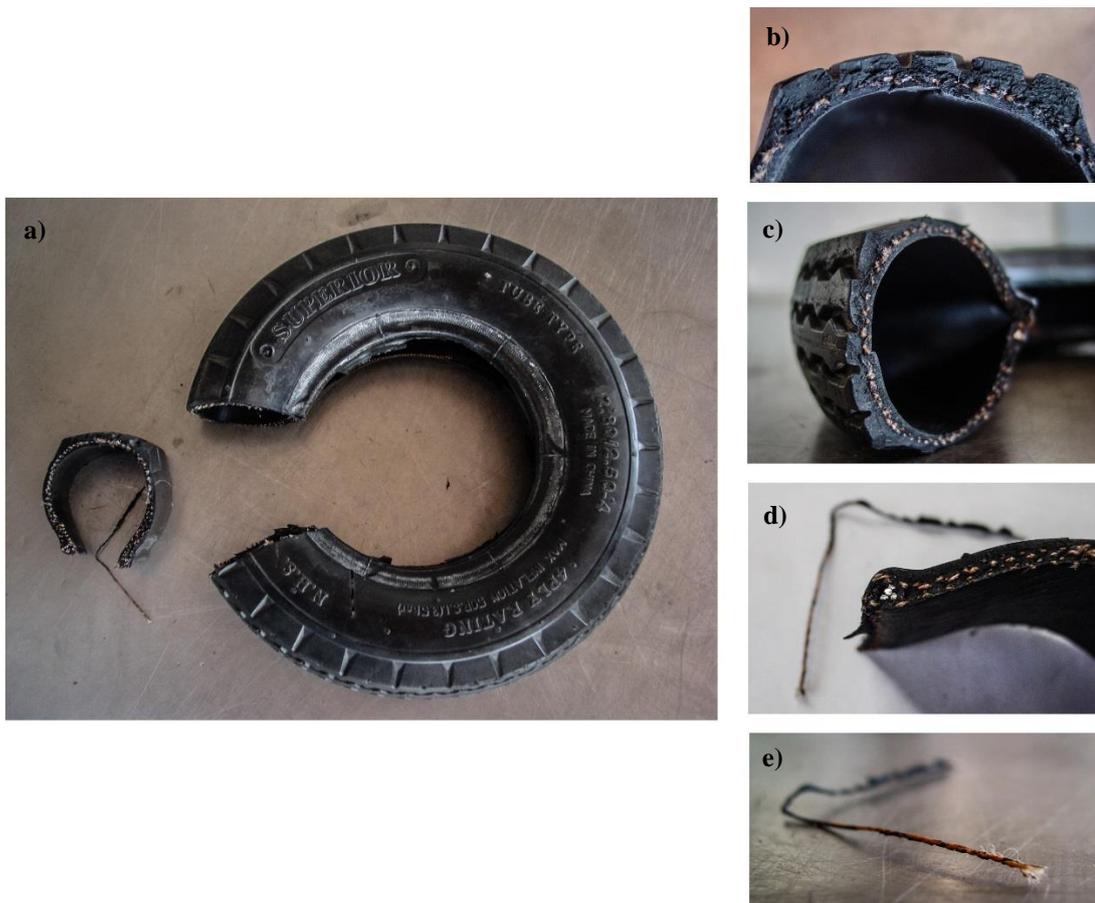


Figura 3.24 –Pneu utilizado nos ensaios: a) Pneu e secção de corte b) Almofada de proteção e carcaça; c) Secção transversal; d) Arame do talão; e) Fio da carcaça



## 4 ANÁLISE DE RESULTADOS

### 4.1 Introdução

A Análise de Resultados tem como principal objetivo expor, analisar e associar os resultados obtidos através dos vários ensaios de caracterização, que em conjunto devem responder aos objetivos propostos inicialmente nesse trabalho. Este estudo permite determinar e avaliar as características das diferentes superfícies estudadas, das lajetas graníticas e das misturas betuminosas bem como o seu desempenho relativamente ao consumo energético e consequente resistência ao rolamento.

O Subcapítulo 4.2 expõe a análise dos ensaios de caracterização dos betumes utilizados, bem como as principais conclusões e a comparação entre o betume convencional, 35/50 CEPSA, e o betume modificado comercial, Styrelf.

No Subcapítulo 4.3 apresenta-se os resultados da caracterização das misturas betuminosas, nomeadamente da caracterização superficial.

Relativamente ao Subcapítulo 4.4 expõe-se os resultados dos consumos energéticos obtidos nos ensaios de calibração, bem como as principais conclusões e as comparações entre os materiais.

No que concerne ao Subcapítulo 4.5 avalia-se o desempenho das lajetas graníticas de acordo com cada um dos parâmetros seleccionados para a realização dos ensaios e futura distinção entre eles. Os parâmetros são a textura e atrito, a temperatura média ambiente no interior do ensaio de pista, a velocidade da mesa e a pressão no pneu.

No Subcapítulo 4.6 avalia-se o desempenho das lajetas betuminosas do mesmo modo que as de granito, através da avaliação dos parâmetros especificados.

As áreas de contacto entre o pneu e as diferentes superfícies nas diversas circunstâncias de ensaio encontram-se estimadas no Subcapítulo 4.7

A comparação entre o desempenho das misturas betuminosas e as lajetas graníticas é realizado no último Subcapítulo 4.8, onde se retiram as elações finais acerca das superfícies e rigidez dos materiais, e associação com as áreas de contacto.

## 4.2 Caracterização básica dos betumes

No sentido de avaliar o comportamento dos dois betumes, realizaram-se inicialmente os ensaios convencionais de caracterização desses betumes. Os ensaios de caracterização básica realizados compreendem o Ensaio de Penetração a 25 °C e o Ensaio de Temperatura de Amolecimento, uma vez que fornecem informação imediata e de fácil comparação com o betume convencional e o betume modificado comercial.

Na Tabela 4.1 estão representados os resultados médios obtidos na caracterização dos betumes para o Ensaio de Penetração a 25 °C e para o Ensaio de Temperatura de Amolecimento.

Tabela 4.1 – Caracterização básica dos betumes utilizados nas misturas betuminosas

Betume	Penetração a 25 °C (10 <sup>-1</sup> mm)	Ponto de amolecimento Anel e bola (°C)
35/50 CEPSA	36,7	54,8
Styrelf	37,2	65,5

Relativamente aos ensaios de caracterização básica, como se verifica trata-se de betumes convencionais cuja rigidez se confirma pelo baixo valor da penetração. Os valores das penetrações encontram-se dentro da gama expectável para os betumes utilizados.

## 4.3 Caracterização superficial das misturas betuminosas

O ensaio da mancha de areia foi realizado nas lajes da mistura PA 14 e AC 14 e nas superfícies ranhuradas com o objetivo de se determinar a diferença da rugosidade entre elas e garantir que a laje PA 14 se trata de uma mistura aberta. O ensaio permitiu obter a altura média de areia em cada superfície cujos resultados se encontram apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Profundidade média de textura no ensaio de mancha de areia

<b>Superfície</b>	<b>PMT (mm)</b>
PA 14	1,3
AC 14	0,7
Ranhuradas com maior espaçamento	1,2
Ranhuradas com menor espaçamento	1,9

Conforme o pretendido, os resultados encontram-se dentro do expectável e a presente laje PA 14 possui uma superfície mais rugosa em relação à mistura convencional. Ainda se confirma que a superfície ranhurada com menor espaçamento entre rasgos é conseqüentemente a que possui maior profundidade média da textura, e textura da PA 14 é semelhante à da lajeta de granito com maior espaçamento. A mistura convencional AC 14 é a que apresenta menor profundidade média de textura e o seu baixo valor justifica-se pela curva granulométrica contínua. Espera-se poder confirmar a influência destes valores nos resultados dos ensaios de consumo das diferentes superfícies.

#### **4.4 Consumos energéticos nos ensaios iniciais de calibração**

Tal como o nome indica, neste subcapítulo pretende-se analisar os resultados dos consumos energéticos obtidos nos ensaios iniciais onde foram realizados testes separados em duas categorias: com contacto do pneu/pavimento e sem contacto. Já referido anteriormente, foram utilizadas uma lajeta betuminosa, uma placa de madeira lisa e a carga adicional de 18,05 kg, pertencente ao ensaio de pista, para os ensaios onde se regista o contacto da roda com a superfície. Nos ensaios onde o contacto não existe foi testado o comportamento do consumo energético gerado pelo movimento da mesa do ensaio de pista através de vários pesos, por forma a determinar uma relação entre o próprio movimento e uma carga adicional imposta sobre a mesa e o consumo devido ao esforço do movimento.

##### **4.4.1 Ensaios sem contacto do pneu com a superfície**

Na Tabela 4.3 estão descritas as cargas de cada um dos materiais utilizados nos ensaios que têm preponderância no comportamento energético.

Tabela 4.3 – Pesos dos materiais utilizados em quilogramas

<b>Material</b>	<b>Peso (Kg)</b>
1	1,0295
2	5,0
3	5,5635
4	8,205
5	8,589
6	10,4595
7	20,38
8	40,64

Os resultados obtidos nos ensaios onde o contacto entre a roda e a superfície é inexistente estão especificados na Tabela 4.4. Mais uma vez, tal como nos ensaios anteriores, a velocidade da mesa permaneceu igual (0,848 Hz) e a temperatura o mais constante possível (22 °C).

Tabela 4.4 – Resumo dos dados obtidos nos ensaios de calibração sem contacto pneu/superfície

<b>Descrição do ensaio</b>	<b>Energia</b>		<b>Velocidade da mesa (Hz)</b>
	<b>2 Horas (J)</b>	<b>2 Horas (J/s)</b>	
Material 1	10995,16	1,527	0,848 Hz
Material 2	11076,31	1,538	
Material 3	11228,91	1,560	
Material 4	11566,61	1,606	
Material 5	11648,60	1,618	
Material 6	11640,69	1,167	
Material 7	12489,25	1,735	
Material 8	14096,07	1,958	
Base referência	10 925,1	1,517	

Comparando os resultados dos consumos de energia nos materiais verifica-se que há uma diferença entre os valores podendo considerar-se que o peso é um fator influente e averigua-se que quanto maior for o peso, maior é a energia consumida. Porém, importa saber se esta diferença é um aumento linear ou não.

A Figura 4.1 e a Tabela 4.5 explicam a variação da energia consumida consoante o aumento do peso do material.

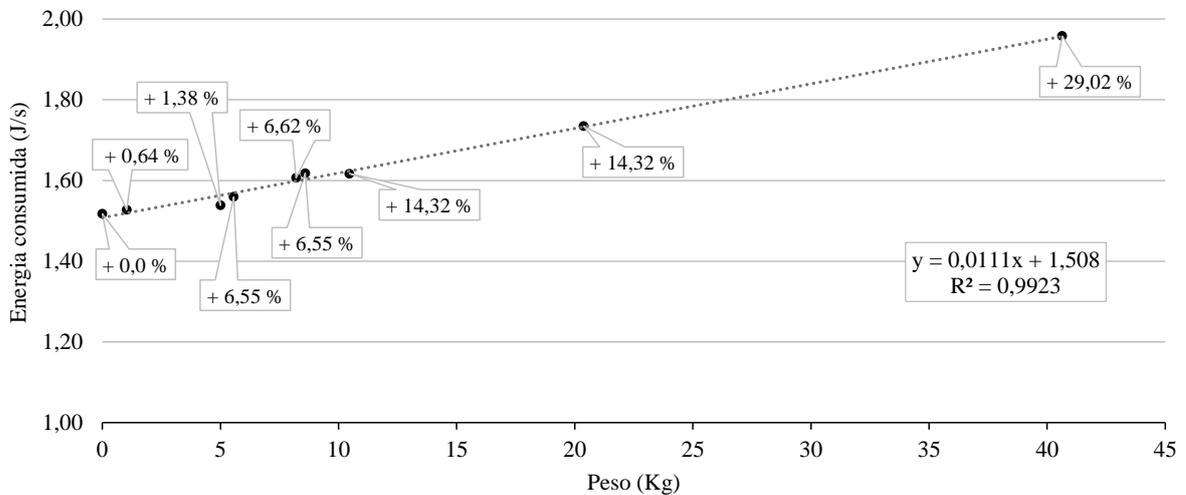


Figura 4.1 – Variação do consumo energético (%) a partir do valor referência

Tabela 4.5 – Relação entre os consumos dos diferentes materiais com pesos distintos

Material	Variação do consumo energético (%)	Variação do peso (kg)
Referência	0,00	0,0000
Material 1	+ 0,64	+ 1,0295
Material 2	+ 1,38	+ 5,0
Material 3	+ 2,78	+ 5,5635
Material 4	+ 5,78	+ 8,205
Material 5	+ 6,62	+ 8,589
Material 6	+ 6,55	+ 10,4595
Material 7	+ 14,32	+ 20,38
Material 8	+ 29,02	+ 40,64

A título exemplificativo, um aumento de aproximadamente 1 kg sobre a mesa aumenta 0,64 % a energia despendida, enquanto 5,56 kg eleva 2,78 %. O que se verifica através do gráfico de dispersão e o  $R^2$  é que há uma linearidade entre o peso e a energia acrescida e considera-se que o fator carga exerce influência sobre os resultados obtidos. Assim, obteve-se a reta de peso/energia para os ensaios sem contacto da roda, que servirá de referência para os ensaios seguintes.

#### 4.4.2 Ensaios com contacto do pneu com a superfície

Os dados recolhidos dos ensaios de calibração no caso de contacto da roda com a superfície estão especificados na Tabela 4.6. Foram realizados para um tempo limite de 2 horas, a velocidade da mesa permaneceu igual (0,848 Hz) e mantendo a temperatura controlada (22 °C) e semelhante em todos para que não seja um fator a avaliar nesta etapa. Os ensaios foram numerados para facilitar a compreensão aquando a descrição e análise de resultados, sendo assim referidos pelo correspondente número.

Tabela 4.6 – Resumo dos dados obtidos nos ensaios de calibração com contacto pneu/superfície

Descrição do ensaio	Energia		Velocidade da mesa (Hz)
	2 Horas (J)	2 Horas (J/s)	
Material 1	11707,25	1,626	0,848 Hz
Material 2	12024,58	1,670	
Material 3	12069,61	1,676	
Material 4	12280,72	1,706	
Material 5	12311,41	1,710	
Material 6	12460,90	1,731	
Material 7	13253,75	1,841	
Material 8	14872,93	2,066	
Base referência	11624,98	1,615	

A partir de diferentes pesos e respetivos consumos obtidos nos ensaios de calibração chegou-se à reta peso/energia (Equação 5). Utilizou-se a placa lisa como referência para a determinação das retas de calibração depois de se terem realizado alguns ensaios preliminares com diferentes superfícies e se ter verificado que a placa lisa era a que apresentava menores valores de consumo.

$$\text{Consumo} = 0,0111 \times \text{Peso} + 1,508 \quad (5)$$

Para determinar a reta relativa ao contacto da roda sem peso realizaram-se ensaios de calibração tal como os anteriores (sem contacto) e novamente a placa lisa foi utilizada como referência da

determinação da reta. A reta obtida (Equação 6) é paralela à reta dos ensaios sem contacto (Equação 5).

$$\text{Consumo} = 0,0111 \times \text{Peso} + 1,616 \quad (6)$$

Da mesma forma se calcula a reta relativa ao contacto da roda com a superfície mais o peso adicional de 18,05 Kg (Equação 7).

$$\text{Consumo} = 0,0111 \times \text{Peso} + 2,07552 \quad (7)$$

Para cada grupo de ensaios com as mesmas condições (frequência, pressão e temperatura) foram ensaiados vários pesos para a determinação da equação de referência (semelhante à Equação 5, sem contacto) e as restantes equações obtidas pelo mesmo processo e sempre em comparação à placa lisa.

Para se atingir o valor da variação provocada pela rugosidade das superfícies, calcularam-se as diferenças entre os valores reais (medidos através dos ensaios) com os valores resultantes de cada uma das equações. As diferenças de consumo obtidas são comparadas com a placa lisa e indicam a influência da rugosidade para as mesmas condições de ensaio.

Na Tabela 4.7 estão representados os valores de energia obtidos na reta dos ensaios sem contacto da roda/superfície (Equação 5) e os valores de energia obtidos para as duas restantes retas influenciadas pelo contacto da roda com a superfície.

Tabela 4.7 – Valores de energia, em função do peso, para definição das retas de calibração

	Peso (Kg)									
	0	1,0295	5,0	5,5635	8,205	8,589	10,4595	20,38	40,64	
Energia (J/s)										
	Equação 5	1,517	1,527	1,538	1,560	1,606	1,618	1,617	1,735	1,958
	Equação 6	1,615	1,626	1,670	1,676	1,706	1,710	1,731	1,841	2,066
	Equação 7	2,076	2,087	2,131	2,137	2,167	2,171	2,192	2,302	2,527

A representação gráfica das equações de energia em função do peso aplicado na mesa para as situações de contacto da roda com a superfície e contacto da roda com superfície com o peso adicional é visível na Figura 4.2.

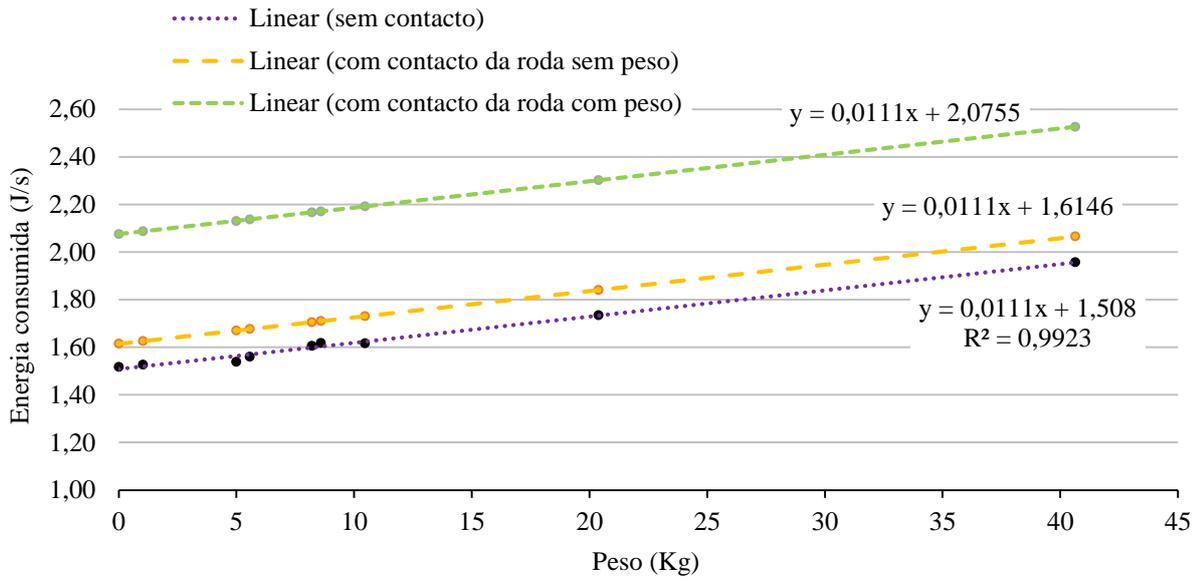


Figura 4.2 – Representação das retas de consumo de energia em função do peso

Verifica-se então o paralelismo entre as retas de consumo de energia, em função do peso, bem como as equações de cada uma.

Na Tabela 4.8 os dados e resultados dos ensaios realizados na placa lisa para o caso de duas pressões, nomeadamente 3,0 bar e 1,5 bar.

Tabela 4.8 – Ensaios realizados para avaliação da influência de diferentes parâmetros nos consumos energéticos

Grupo de ensaio	Material	Peso do material (Kg)	Carga adicional	Pressão (bar)	Frequência (Hz)	Temperatura (°C)	Consumo energia medido no ensaio de pista		Eq. 5	Eq. 6	Eq. 7
							Sem contacto da roda (J)	Com contacto da roda (J)	Sem contacto (J)	Com contacto da roda (J)	Com contacto da roda com peso (J)
Ensaios de calibração											
1	Placa lisa	1,0295	com sem	3,0	0,848	22,0	10995,16	$\frac{13969,91}{11568,56}$	10939,88	11513,00	13914,63
2	Placa lisa	1,0295	com sem	1,5			10995,16	$\frac{15081,33}{11762,51}$	10939,88	11707,25	15026,02

Conforme a tabela anterior, na placa lisa de madeira verifica-se um pequeno aumento do consumo de energia à medida que a pressão do pneu diminui, quer para os ensaios com peso quer sem peso.

Através dos resultados do grupo 1, expressos na tabela anterior, é possível verificar a tendência acerca da pressão no pneu e demonstrar que a energia é constante e crescente ao longo do tempo. A Figura 4.3, em termos de energia medida pelo ensaio de pista com contacto da roda, demonstra que o emprego da carga adicional de 18,05 kg o valor da energia evidencia mais as características superficiais.

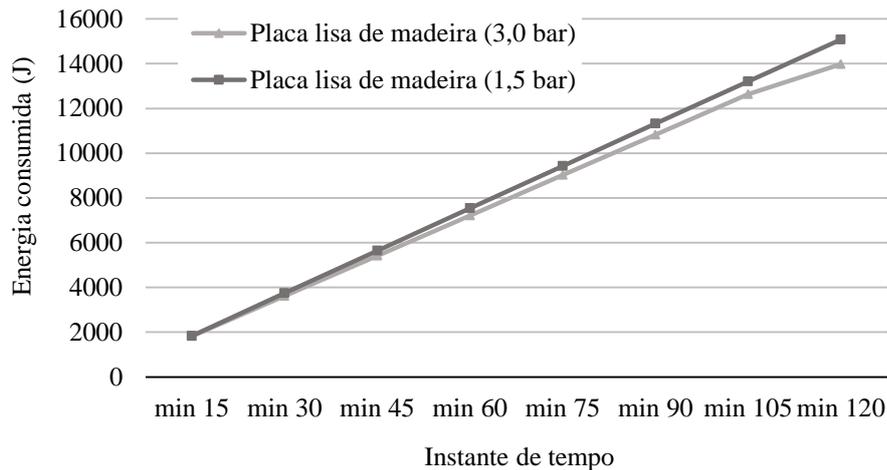


Figura 4.3 – Resultados da energia obtidos nos grupos 1 e 2 com contacto da roda com peso

A energia é contante e crescente ao longo do tempo e apesar da diferença da energia obtida entre a pressão de 3,0 bar e a de 1,5 bar com a carga adicional (grupos 1 e 2) ser reduzida, é suficiente para comprovar a tendência esperada.

O estado em que encontram os pneus é determinante no consumo energético que o veículo apresenta. Se os pneus estiverem em boas condições, a segurança e o conforto sentidos pelos passageiros serão notáveis. Assim, se a pressão dos pneus estiver em níveis adequados, normalmente 2,0 bar para um veículo de passageiros e um pneu comum, a área de contacto com o pavimento é inferior e a resistência ao rolamento menor do que se os pneus se encontrassem mais vazios.

#### 4.5 Consumos energéticos nos ensaios realizados em diferentes superfícies

O estudo da variação do consumo energético de acordo com a rugosidade e atrito assentou sobre as diferentes características superficiais das lajetas. Uma descrição detalhada das lajetas

graníticas está referida no Subcapítulo 3.3 cujos pesos são semelhantes e apenas a textura superficial altera. Assim, para este estudo efetuou-se uma comparação entre as quatro texturas (ranhurada com maior espaçamento, ranhurada com menor espaçamento, rugosa e lisa) para diferentes condições de ensaio representadas na Tabela 4.9. Uma vez que se trata apenas de um material granítico, o módulo de rigidez é igual nas duas lajetas, o que é importante para que todas as diferenças verificadas sejam devidas exclusivamente às características superficiais.

Tabela 4.9 – Dados e resultados dos ensaios efetuados em diferentes superfícies

Grupo de ensaios	Material	Peso do material (Kg)	Carga adicional	Pressão (bar)	Frequência (Hz)	Temperatura (°C)	Consumo energia medido no ensaio de pista			Variação da energia (mJ/s)	Variação da energia (%)	
							Eq. 5		Eq. 6			Eq. 7
							Sem contacto da roda (J)	Com contacto da roda (J)	Sem contacto (J)			Com contacto da roda (J)
3	Ranhurada maior espaçamento	9,919	sem	3,0	0,848	22,0		13358,20			51,01	3,0%
			com				11660,69	17604,97	11650,33	12980,56	0,00	102,06
	Ranhurada menor espaçamento	10,4595	sem					12842,70			-20,59	-1,2%
			com		17349,72				17115,52			66,61
	Superfície rugosa	10,4595	sem					13624,67			53,94	3,2%
			com	11906,07	18999,64	11693,52	13023,76	0,00	261,68	11,7%		
Superfície lisa		sem					13236,31			0,00		
		com					17115,52			0,00		
4	Ranhurada maior espaçamento	9,919	sem	3,0	0,848	30,0		14865,24			250,86	14,5%
			com				11144,11	18848,02	11319,13	13234,08	0,00	361,35
	Ranhurada menor espaçamento	10,4595	sem					15917,14			396,95	23,0%
			com		19433,96				442,73	20,4%		
	Superfície rugosa	10,4595	sem					15331,64			280,17	16,2%
			com	11399,49	20970,22	11362,32	13277,28	0,00	620,63	28,6%		
Superfície lisa		sem					13314,44			0,00		
		com					16501,68			0,00		
5	Ranhurada maior espaçamento	9,919	sem	3,0	1,065	22,0		16847,11			105,53	4,9%
			com				13285,76	22478,54	13479,13	16280,68	0,00	-39,93
	Ranhurada menor espaçamento	10,4595	sem					16167,87			11,19	0,5%
			com		22492,14				-38,04	-1,8%		
	Superfície rugosa	10,4595	sem					16368,51			2,20	0,1%
			com	13551,14	23355,22	13522,32	16323,87	0,00	44,97	1,5%		
Superfície lisa		sem					16352,69			0,00		
		com					23031,44			0,00		

A partir destes valores segue-se a explicação acerca dos resultados obtidos em cada grupo de ensaio, a influência deles no desempenho do equipamento de ensaio e a influência relativas à pressão, temperatura e frequência.

Para o Grupo 3, a Figura 4.4 demonstra as diferenças entre os resultados obtidos sobre a resistência ao rolamento com e sem peso adicional, tomando como referência a superfície lisa.

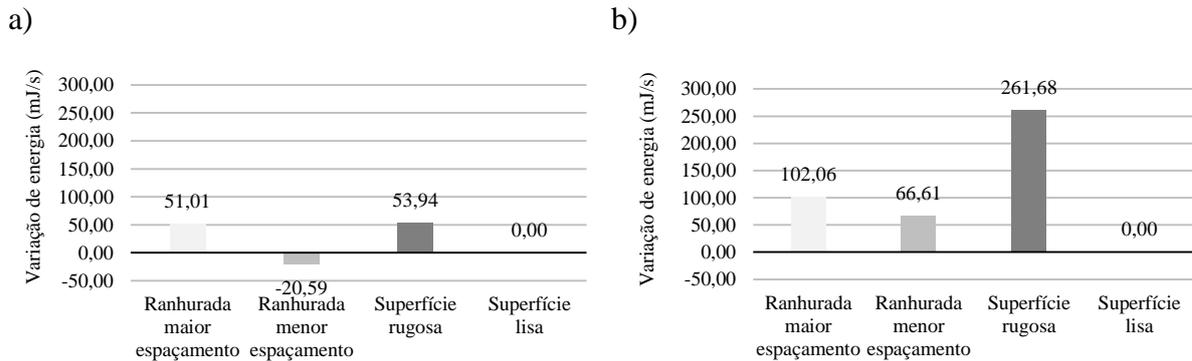


Figura 4.4 – Variação da energia medida no grupo 3 de ensaios: a) sem peso; b) com peso

A variação da energia entre os ensaios com e sem peso é evidentemente menor nas situações sem o peso. Isto deve-se ao facto de haver muitas ranhuras, quer no pneu quer nas superfícies, e haver uma redução global das áreas de contacto. Como esperado, a circulação sobre a superfície rugosa consome mais energia em relação às outras superfícies, pois a roda fica sujeita a um atrito constante, enquanto no caso da superfície ranhurada de menor espaçamento o contacto é interrompido pelas ranhuras, não sendo constante e assim produzindo menor consumo. Por outras palavras, o facto de existirem ranhuras pode provocar uma “quebra” de consumo por redução dos pontos de contacto, reduzindo o atrito como no caso da superfície mais lisa. Seguindo a mesma teoria, a superfície de maior espaçamento provoca menor gasto de energia do que a rugosa, pois a distância entre rasgos é maior e a zona “lisa” mais constante.

Para todos os ensaios, o uso da carga adicional evidencia os resultados, pois facilita o contacto entre o pneu e as superfícies. Assim, verifica-se um maior atrito resultante de maiores áreas de contacto e, conseqüentemente, consumos mais elevados. Na superfície ranhurada de maior espaçamento, o consumo gerado pelo atrito é maior do que na ranhurada de menor espaçamento uma vez que devido ao facto de a superfície ter um espaçamento maior entre ranhuras, quando o pneu “encontra” a ranhura esta fica mais exposta, enquanto na superfície de menor espaçamento as próprias ranhuras do pneu podem coincidir com as ranhuras superficiais e assumir um desempenho mais semelhante ao de uma superfície lisa.

O Grupo 4 de ensaios difere na temperatura em relação aos grupos anteriores. Para a temperatura de 30 °C, os resultados obtidos nas diferentes superfícies em relação à superfície lisa são significativamente mais elevados (Figura 4.5).

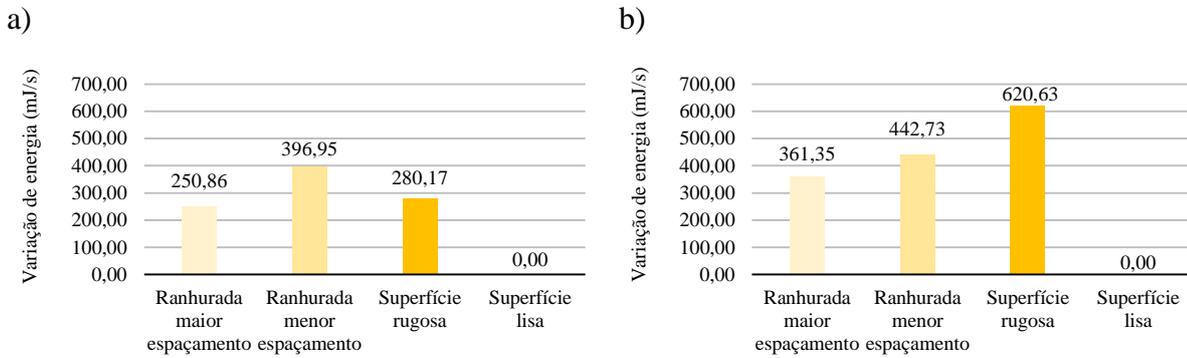


Figura 4.5 – Resultados da energia obtidos no grupo 4 de ensaios: a) sem peso; b) com peso

O efeito da temperatura é o de mais difícil confirmação, uma vez que os resultados do contacto do pneu com a superfície poderão ser influenciados por outras variáveis externas como a lubrificação dos carretos que permitem o movimento da mesa. A massa de lubrificação aplicada nos carretos quando exposta a uma temperatura superior pode reduzir de viscosidade, facilitando o movimento. Assim, o efeito do atrito proporcionado pelas superfícies com maior textura/rugosidade poderá fazer-se sobressair em relação à superfície lisa. Ainda se pode acrescentar o efeito do pneu amolecido pela temperatura que cria maior contacto com a superfície, nomeadamente no caso das lajetas ranhuradas, onde o pneu terá maior facilidade em penetrar nas ranhuras.

No que concerne aos ensaios do Grupo 5, o parâmetro alterado foi o da frequência, mantendo-se a pressão de 3,0 bar e a temperatura média de 22 °C. A representação gráfica dos resultados da variação do consumo destaca-se na Figura 4.6, onde mais uma vez a comparação é efetuada em relação à superfície lisa.

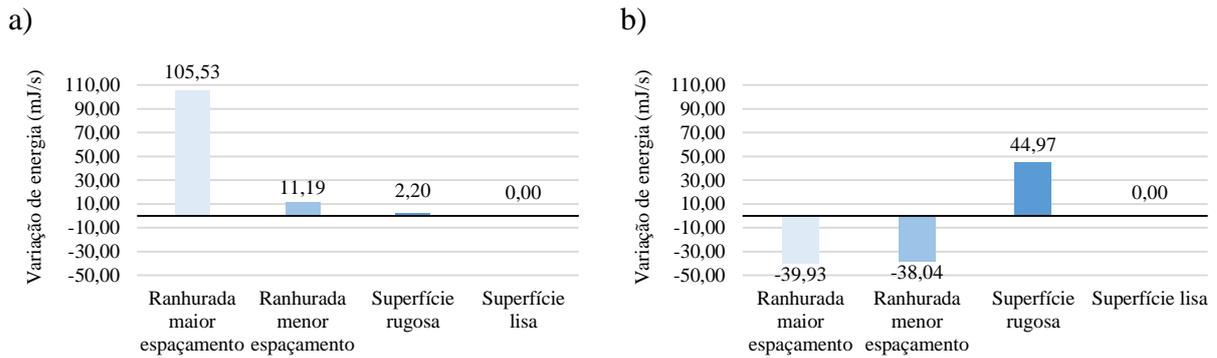


Figura 4.6 – Resultados da energia obtidos no grupo 5 de ensaios: a) sem peso; b) com peso

Analisando os resultados dos ensaios sem o peso adicional verifica-se que a variação no consumo energético em relação a uma superfície lisa é relativamente insignificante à exceção da superfície ranhurada de maior espaçamento. Esta destaca-se muito mais das outras eventualmente devido ao facto de, estando a roda sujeita a uma velocidade superior poder sofrer pequenos solavancos quando se cruza com as ranhuras. O facto de a circulação sobre as restantes superfícies não apresentar a mesma tendência poderá dever-se ao comportamento viscoelástico do pneu. Ao aumentar a frequência (velocidade) de circulação o pneu poderá ter um comportamento mais elástico e dessa forma, o menor contacto com a superfície poderá resultar num menor consumo. Este facto é ainda mais visível nos ensaios com peso adicional (que provoca um aumento da área de contacto entre o pneu e a superfície), resultando num consumo inferior para as superfícies ranhuradas, por comparação com a superfície lisa.

De um modo geral, todos os ensaios levam a estabelecer que a superfície rugosa é a que mais provoca resistência e atrito entre o pneu e a superfície do pavimento, como seria de esperar. É possível confirmar a tendência acerca da rugosidade superficial e o consumo energético associado.

#### 4.6 Consumos energéticos nos ensaios com lajetas betuminosas

Após a formulação, produção das misturas betuminosas e corte das lajetas com dimensões 30x30 cm, averiguaram-se as características visuais da textura superficial, que correspondiam ao expectável (Figura 4.7). Apenas na lajeta da mistura convencional AC 14 se nota alguma falta de homogeneidade na textura devida a efeitos de compactação. Assim, seleccionou-se

cuidadosamente a zona da laje onde iria estar em contacto com a roda para que as características fossem o mais homogêneas possível.

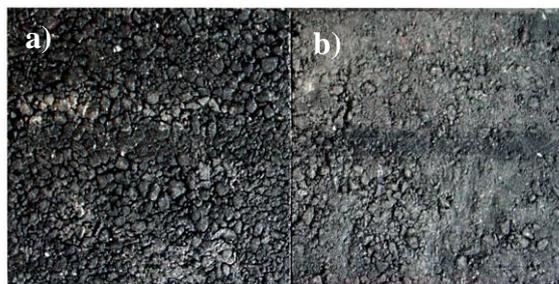


Figura 4.7 – Características superficiais das misturas betuminosas: a) Mistura PA 14;  
b) Mistura AC 14

Todos os ensaios realizados para as duas misturas betuminosas tiveram a duração de 2 horas e foram distinguidos em 3 ensaios com diferentes características, variando apenas um parâmetro de cada vez. Os resultados obtidos apresentam-se na Tabela 4.10.

Tabela 4.10 – Dados e resultados dos ensaios efetuados nas misturas betuminosas

Grupo de ensaios	Material	Peso do material (Kg)	Carga adicional	Pressão (bar)	Frequência (Hz)	Temp. (°C)	Consumo energia medido no ensaio de pista		Eq. 5	Eq. 6	Eq. 7	Variação da energia (ml/s)	Variação da energia (%)
							Sem contacto da roda (J)	Com contacto da roda (J)	Sem contacto (J)	Com contacto da roda (J)	Com contacto da roda com peso (J)		
<b>Misturas betuminosas</b>													
6	AC14	8,589	sem	3,0	0,848	22,0	11648,60	12498,73	11544,03	12206,43		26,07	1,6%
	PA 14	8,205	sem				11566,61	12350,34	11513,34	12175,74		16,85	1,1%
7	AC14	8,589	sem	1,5	0,848	22,0	11648,60	12848,85	11544,03	12350,43		54,70	3,4%
	PA 14	8,205	sem				11566,61	14965,46	11513,34	12319,74		360,06	22,2%
8	AC14	8,589	sem	1,5	1,065	22,0	13298,15	15023,45	13372,83	14726,43		51,63	2,6%
	PA 14	8,205	sem				13219,16	15220,2	13342,14	14695,74		89,92	4,6%

No ensaio 6 e no ensaio 7 o parâmetro que varia é a pressão de enchimento do pneu, por forma a determinar com maior rigor a sua influência nos consumos energéticos, distinguir o desempenho das lajetas betuminosas e compará-las com a placa lisa (referência). No que concerne ao ensaio 8, o parâmetro que altera é a velocidade da mesa.

Analogamente aos resultados obtidos no grupo 6, nas misturas betuminosas, a Figura 4.8 expõe a comparação das superfícies comparativamente à superfície lisa.

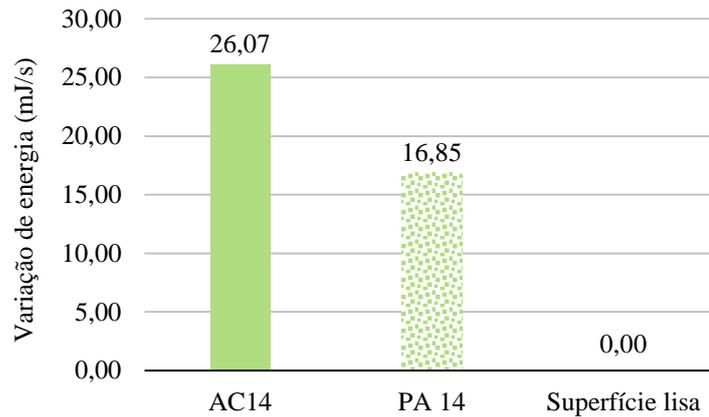


Figura 4.8 – Resultados da variação de energia obtidos no grupo 6 (ensaios nas misturas betuminosas) por comparação com a superfície lisa

Analisando os resultados de energia nas misturas betuminosas do Grupo 6, verifica-se um aumento de energia devido à rugosidade das superfícies em relação à superfície lisa, onde se verifica que a superfície com menor gasto de energia é a da mistura porosa PA 14. Este comportamento poderá ser relacionado com os resultados obtidos nas lajetas de granito ranhuradas, onde a existência de menores pontos de contacto entre o pneu e a superfície poderão originar um menor consumo energético.

No que concerne ao Grupo 7, os parâmetros da frequência e da temperatura mantêm-se iguais (0,848 Hz e 22 °C, respetivamente) e a pressão diminui de 3,0 para 1,5 bar. Os resultados dos ensaios nas duas lajes betuminosas expressos na variação de energia comparada à superfície lisa são apresentados na Figura 4.9.

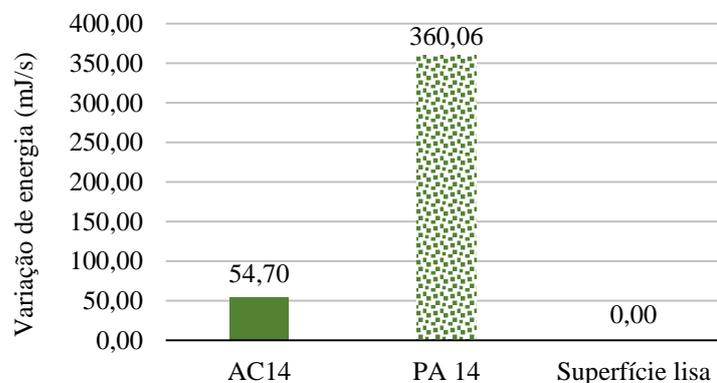


Figura 4.9 – Resultados da energia obtidos no grupo 7 de ensaios nas misturas betuminosas

Através da Figura 4.10 é possível compreender a influência que a pressão de enchimento dos pneus pode ter no consumo energético associado à circulação dos veículos. Com o aumento da área de contacto entre o pneu e a superfície (devida à menor pressão interna do pneu), a maior textura da superfície porosa originou um aumento muito significativo da energia, por comparação com as outras duas superfícies. Como o pneu fica mais vazio, a área de contacto aumenta e por sua vez, adapta-se mais facilmente às asperezas das superfícies. Tendo sido ambas testadas nas mesmas condições de ensaio, a superfície porosa da mistura PA 14 elevou em 360,06 mJ/s (ou seja, em 22,2%) a energia provocada pelo atrito da superfície comparativamente à lisa. O mesmo se sucede na mistura AC 14, mas para esta a variação foi inferior, como seria de esperar.

O último grupo de ensaios em misturas betuminosas apresenta uma pressão de 1,5 bar, frequência mais elevada de 1,065 Hz e temperatura igual aos anteriores, 22 °C, cujos resultados da variação da energia em relação à superfície lisa se representam na Figura 4.10.

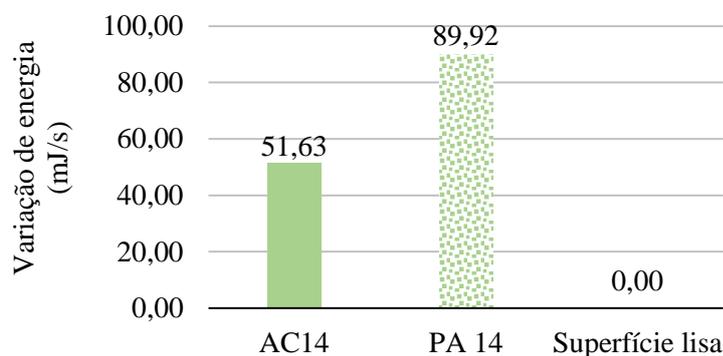


Figura 4.10 – Resultados da energia obtidos no grupo 8 de ensaios nas misturas betuminosas

Neste caso, a mistura PA 14 provocou uma maior variação de energia do que a AC 14, embora não tão evidenciada como no grupo 7. O facto de a velocidade ser mais elevada não permite que o pneu se adapte tão facilmente às rugosidades superficiais apesar de a pressão de enchimento ser de apenas 1,5 bar.

Com base nos resultados apresentados é possível concluir que um aumento da velocidade poderá diminuir o efeito que uma pressão de enchimento mais baixa pode ter no aumento do

consumo energético associado à circulação sobre pavimentos betuminosos. Essa redução do efeito é mais notória no caso de pavimentos mais porosos.

#### 4.7 Influência da velocidade da mesa no consumo

Altas velocidades conjugadas com uma condução característica de via rápida podem resultar em aumentos da resistência ao rolamento com o aumento da frequência de deformação no pneu (Menzies e Zucchetto, 2006). Estando comprovado que o comportamento do condutor afeta o consumo energético do veículo, e que o próprio veículo, nomeadamente o contacto dos pneus com o pavimento, estão diretamente relacionados com a resistência ao rolamento, analisou-se os resultados dos ensaios realizados com a superfície lisa e com duas velocidades de circulação.

O parâmetro da velocidade pretende confirmar se o seu aumento provocará maior ou menor consumo energético por meio da resistência ao rolamento, para uma determinada textura superficial do pavimento. Para se poder comparar o efeito da frequência no consumo do equipamento, as condições iniciais dos ensaios têm que ser idênticas, apenas variando o parâmetro da frequência. Os ensaios que permitem essa comparação são os do Grupo 3, com uma frequência de 0,848 Hz, e os do Grupo 5, com frequência de 1,065 Hz. A Tabela 4.11 permite analisar o efeito da superfície lisa em cada um dos ensaios através do consumo obtidos pelas equações, com e sem peso.

Tabela 4.11 – Influência da frequência no consumo do equipamento de ensaio

Grupo de ensaios	Material	Peso do material (Kg)	Carga adicional	Pressão (bar)	Frequência (Hz)	Temp. (°C)	Consumo energia medido no ensaio de pista			Eq. 5	Eq. 6	Eq. 7	Consumo total sem peso (J)	Consumo unitário com peso (mJ/s)	Consumo total com peso (J)	Consumo unitário com peso (mJ/s)		
							Sem contacto da roda (J)	Com contacto da roda (J)	Sem contacto (J)								Com contacto da roda (J)	Com contacto da roda com peso (J)
							3	Superfície rugosa	10,4595								sem	3,0
	Superfície lisa		com				18999,64											
			sem				13236,31					3300,1	458,3	6099,7	847,2			
			com				17115,52											
5	Superfície rugosa	10,4595	sem	3,0	1,065	22,0	16368,51	13551,14	13522,32	16323,87	23002,63							
	Superfície lisa		com				23355,22											
			sem				16352,69											
			com				23031,44											

Relativamente à diferença do consumo no caso de contacto da roda sem o peso, é possível concluir que o consumo do equipamento do ensaio de pista aumenta 458,3 mJ/s (ou 3300,1 J) em relação às condições iniciais (temperatura média de 22 °C, pressão de 3,0 bar e frequência de 0,848 Hz) e com o peso o aumento é ainda maior (6099,7 J/s). Está assim verificado que o esforço produzido pelo movimento da mesa do ensaio de pista é maior quando a velocidade é superior, como esperado.

#### 4.8 Influência da rigidez no consumo

Uma vez que a profundidade média da textura da superfície ranhurada de maior espaçamento e da superfície da mistura PA 14 são semelhantes, pode-se avaliar o consumo de energia tendo em conta a rigidez. Assim, os ensaios cujas condições de ensaio são semelhantes que permitem realizar esta comparação apresentam-se na Tabela 4.12.

Tabela 4.12 – Influência da rigidez no consumo energético

Grupo de ensaios	Material	Peso do material (Kg)	Carga adicional	Pressão (bar)	Frequência (Hz)	Temp. (°C)	Consumo energia medido no ensaio de pista			Eq. 5	Eq. 6	Eq. 7	Variação da energia (mJ/s)	Variação da energia (%)
							Sem contacto da roda (J)	Com contacto da roda (J)	Sem contacto (J)					
							Sem contacto da roda (J)	Com contacto da roda (J)	Com contacto da roda com peso (J)					
3	Ranhurada maior espaçamento	9,919	sem	3,0	0,848	22,0	11660,69	13358,20	11650,33	12980,56	-	51,01	3,0%	
6	PA 14	8,205	sem				11566,61	12350,34	11513,34	12175,74	-	16,85	1,1%	

Já referido anteriormente, os resultados da variação da energia são em comparação à superfície lisa de cada grupo de ensaios nas mesmas condições de ensaio. Seria expectável obter menores consumos nas lajetas graníticas uma vez que são de elevada rigidez e não se deformam sob a ação da carga. Neste caso verifica-se uma reduzida deformabilidade geral das superfícies estudadas, pois a carga aplicada e as dimensões reduzidas da roda e das lajetas não permitem contabilizar o verdadeiro efeito de escala de um pavimento rodoviário. Portanto as misturas de betão betuminoso resultaram nos menores consumos de resistência. Ainda assim, todos os valores são muito próximos uns dos outros,

#### 4.9 Medição da área de contacto pneu/superfície

Já referido anteriormente, a área de contacto pneu/superfície provoca perdas de energia devido às irregularidades da superfície, pois o pneu fica sujeito a deflexões. Também se viu que o tipo de pneu, o padrão textural da banda de rodagem, o material constituinte, as paredes laterais e a rigidez da borracha, são responsáveis por perdas extras de energia.

Claramente, quando o pneu se encontra a baixos níveis de pressão, a deflexão é maior, e é também claro que quanto maior for a carga aplicada sobre o pneu maior será a deflexão. De outro ponto de vista, um aumento da pressão conduz a uma redução da resistência ao rolamento e consequente efeito de histerese.

Para medição da área de contacto nas superfícies graníticas estudadas, colocou-se uma folha de papel de tamanho A4 sobre a superfície e a roda em andamento. Após alguns segundos, o contacto da banda de rodagem com a folha é visível devido à cor e sujidade da borracha que delinearam o caminho da roda. De outro modo, foi através da técnica da textura que se conseguiu verificar as particulares da área de contacto do pneu com as particularidades da textura de cada superfície.

Na Tabela 4.13 estão representadas as áreas de contacto pneu/pavimento quando o pneu se encontra a um nível de 1,5 bar de pressão. Por sua vez, a Tabela 4.14 refere-se à área de contacto pneu/pavimento para o caso da pressão ser 3,0 bar. Em cada imagem representativa da folha A4, a “pegada” do pneu esquerda é referente ao emprego da carga adicional sobre a roda, enquanto a “pegada” direita é sem esta carga.

Tabela 4.13 – Representação da área de contacto pneu/pavimento, nas quatro superfícies graníticas, para 1,5 bar de pressão

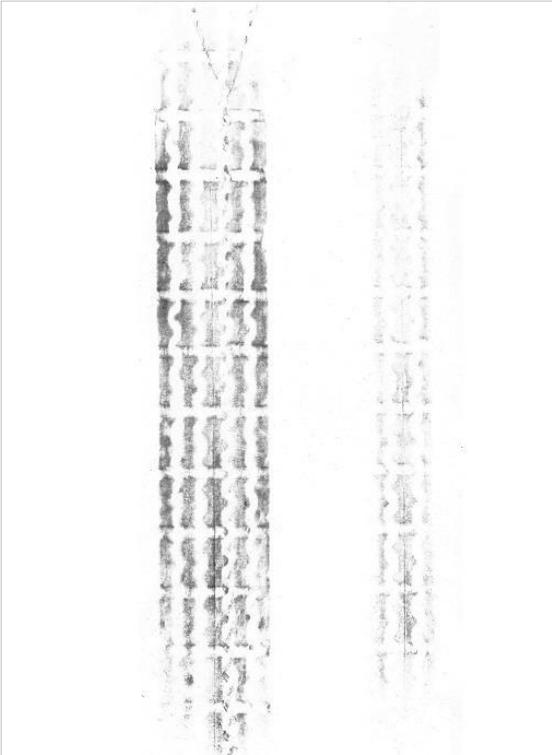
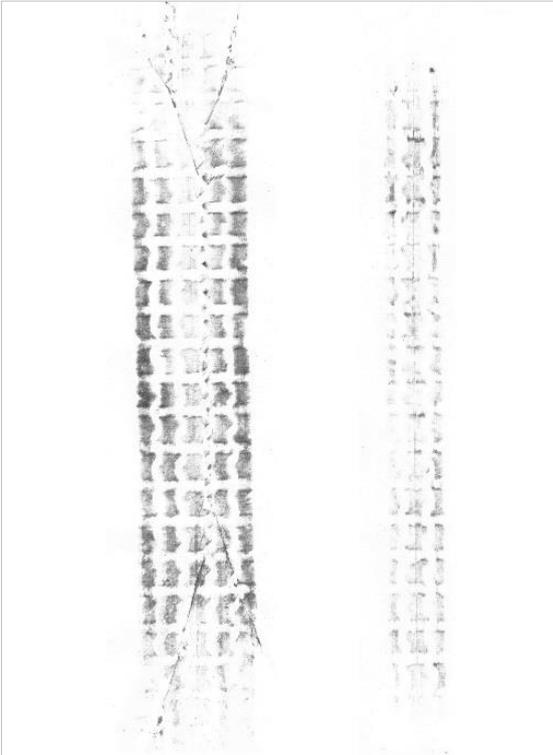
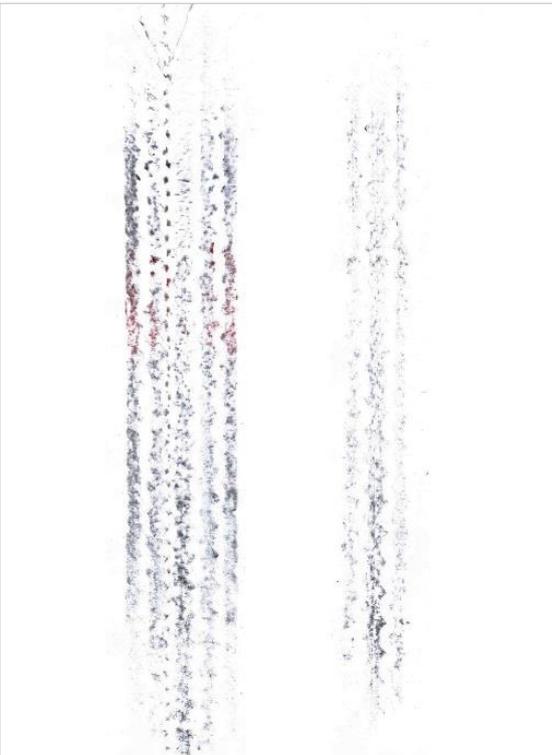
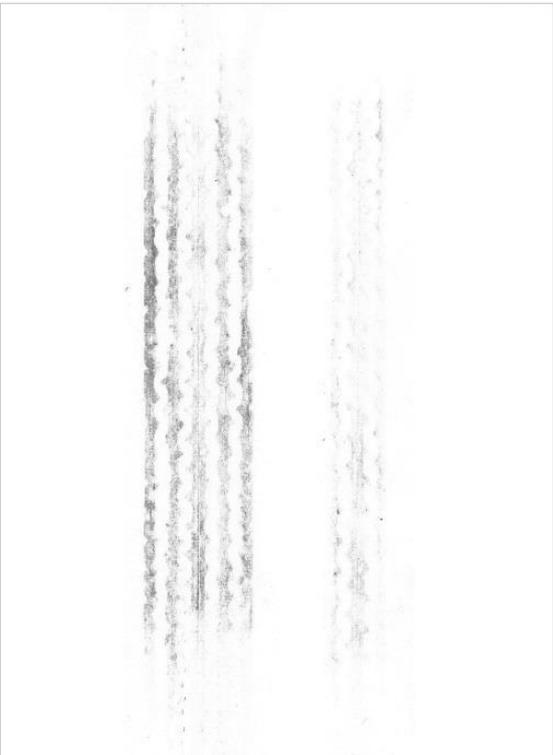
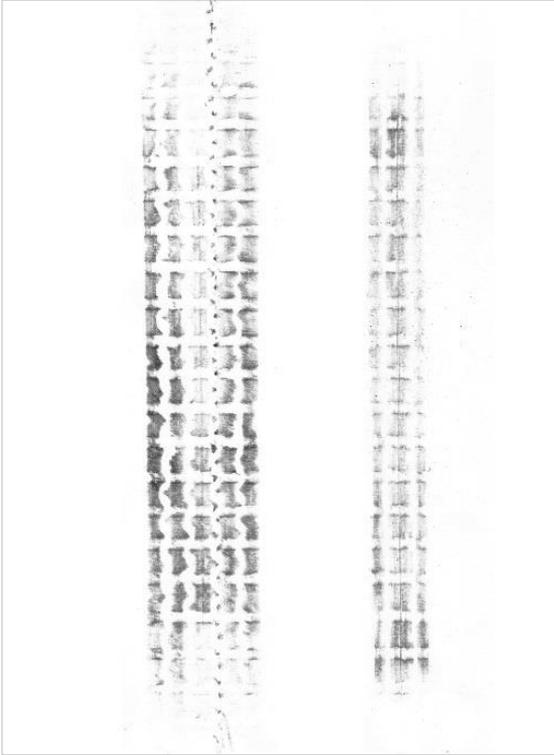
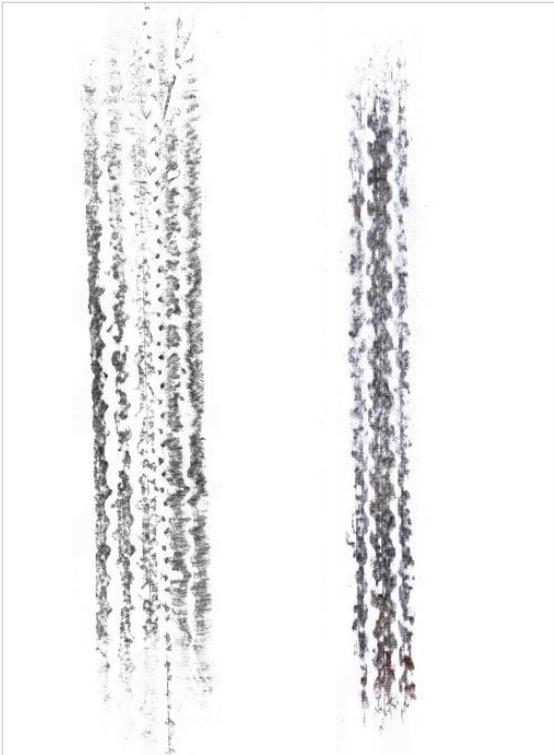
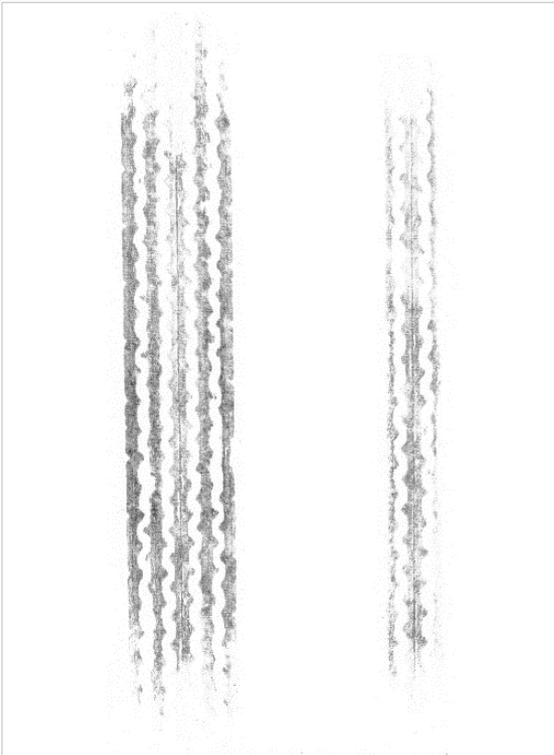
Ranhurada com maior espaçamento	Ranhurada com menor espaçamento
	
Superfície rugosa	Superfície lisa
	

Tabela 4.14 – Representação da área de contacto pneu/pavimento, nas quatro superfícies graníticas, para 3,0 bar de pressão

Ranhurada com maior espaçamento	Ranhurada com menor espaçamento
	
Superfície rugosa	Superfície lisa
	

Foi medida a área de contacto do pneu com a superfície lisa para a situação de pressão a 3,0 bar com e sem peso. A diferença é bastante clara, sendo que a área de contacto com o peso adicional é de aproximadamente 7277,7024 mm<sup>2</sup> e a área de contacto sem o peso é de 3151,3186 mm<sup>2</sup>.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E PERSPETIVAS FUTURAS

### 5.1 Conclusões

Este estudo teve como objetivo determinar a influência de diferentes superfícies no consumo energético, através da resistência ao rolamento no contacto pneu/pavimento, tendo em vista a avaliação da sustentabilidade de diferentes materiais de pavimentação utilizados em camadas de desgaste, nomeadamente, durante a fase de utilização do seu ciclo de vida, uma vez que as suas características Têm influência no consumo de circulação dos veículos.

Assim, foram definidas quatro superfícies de rugosidade diferenciada em lajetas graníticas, sendo um material de elevada rigidez, e duas misturas betuminosas com características superficiais distintas, de modo a serem comparadas em termos energéticos através de ensaios de resistência ao rolamento efetuados no equipamento laboratorial do ensaio de pista.

Os ensaios de calibração sem contacto da roda com o pavimento, contribuíram para se perceber que o peso colocado sobre a mesa de ensaio do *wheel tracking test* provoca um aumento de energia consumida, o qual deverá ser subtraído ao valor medido aquando da circulação da roda sobre uma determinada superfície, de modo a avaliar apenas a contribuição das características superficiais para o aumento ou diminuição do consumo.

Ainda no que concerne aos ensaios de calibração, foi possível verificar a tendência acerca da rugosidade superficial, onde se comprova que a superfície mais rugosa consome mais energia, através do atrito, do que uma superfície lisa. Mais se acrescenta, o uso da carga adicional provoca um aumento da área de contacto, da força necessária para o movimento da roda e consequente resistência ao rolamento, portanto maiores são os consumos. Outra tendência comprovada é acerca da pressão no pneu, quanto menor a pressão no interior, maior é o consumo registado.

Os resultados obtidos nas lajetas graníticas poderão variar em função das condições de ensaio. A título de exemplo pode referir-se que um aumento na textura superficial poderá não implicar um aumento no consumo, por comparação com uma superfície lisa, se a carga aplicada pela

roda for elevada e houver uma combinação de pressão de enchimento do pneu elevada com velocidade de circulação elevada.

A diferença na rugosidade das duas misturas betuminosas verificou-se para uma situação de temperatura mais elevada, sendo a mais aberta, PA 14, a que maior valor apresenta. Porém, numa situação de temperatura amena, o mesmo não acontece, e pondera-se que a existência de menores pontos de contacto entre o pneu e a superfície poderão originar um menor consumo energético.

De forma geral, verifica-se que quanto menor a pressão interior do pneu, maior será o dispêndio de energia, uma vez que aumenta a área de contacto da banda de rodagem e sofre mais perdas de energia por meio da deformação do pneu.

Comparando os resultados obtidos nas lajetas de granito com o desempenho obtido nas misturas betuminosas, quando expostos às mesmas condições de ensaio, seria expectável obter menores consumos nas lajetas graníticas uma vez que são de elevada rigidez e não se deformam sob a ação da carga. No entanto não se nota esse efeito, eventualmente devido à reduzida deformabilidade geral de todas as superfícies estudadas (incluindo as betuminosas), uma vez que a carga aplicada e as dimensões reduzidas da roda e das lajetas não permitem contabilizar o verdadeiro efeito de escala de um pavimento rodoviário. As misturas de betão betuminoso resultaram nos menores consumos de resistência. Ainda assim, todos os valores são muito próximos uns dos outros, destacando-se a superfície rugosa em granito como a de maior perda de energia.

Relativamente às áreas de contacto, ficou claro que o uso de uma carga adicional sobre a roda aumenta a deformação no pneu e conseqüentemente a área da banda de rodagem que fica em contacto com o pavimento. Também com o uso do peso se averiguou que é maior o consumo de energia, ou seja, a roda fica sujeita a maior esforço e a resistência ao rolamento eleva. Entre duas pressões diferentes, 1,5 bar e 3,0 bar, apesar de não se ter medido a área de forma mais rigorosa, a menor pressão apresenta maior deformação, e naturalmente conduz a maior resistência ao rolamento devido ao efeito de histerese.

Das principais dificuldades encontradas, a influência da rugosidade foi a mais difícil de esclarecer. Verificou-se que, nos resultados obtidos nos ensaios de resistência ao rolamento,

nem sempre a superfície mais lisa obteve os consumos mais baixos. Supõe-se que este resultado se deva à área de contacto na interação do pneu com a superfície, pois esta aumenta e produz maior consumo de energia. Outra dificuldade verificou-se no início dos primeiros ensaios, onde o *software* sofreu algumas mudanças para melhorar o registo dos dados e fornecer diretamente o valor da energia, expressa em Joules, consumida em cada teste.

A maior redução da poluição atmosférica pode ser conseguida através da melhoria das propriedades dos pavimentos (textura, rigidez e nivelamento), de forma a reduzirem significativamente o consumo dos combustíveis. Neste trabalho utilizaram-se as texturas ranhuradas lisas transversalmente ao sentido do tráfego, o que provoca mais ruído, desconforto e maior consumo, pois estas texturas são usualmente aplicadas no sentido longitudinal ao movimento por serem mais silenciosas e terem maior capacidade de escoamento de águas.

A escolha dos métodos de construção/reabilitação de um pavimento pode economizar o combustível e reduzir a nossa dependência das importações de petróleo. Também é importante considerar o custo do ciclo de vida de pavimentação e a reabilitação de ambos os tipos de superfícies de pavimento. Uma superfície de betuminoso é substituída por uma nova camada ao fim de 8 a 15 anos de serviço.

## **5.2 Trabalhos futuros**

Como se verificou nos resultados apresentados anteriormente, a utilização de cargas mais elevadas aplicadas à roda aquando do ensaio de resistência ao rolamento produziu resultados mais interessantes e distinguíveis consoante o parâmetro a avaliar. No entanto, houve alguns aspetos que ficaram ainda por esclarecer de forma inequívoca. Assim, de seguida apresentam-se algumas sugestões de trabalhos futuros que poderiam ser realizados para melhorar ou completar o estudo agora realizado.

No que concerne à avaliação do efeito da temperatura nos consumos de energia, dever-se-á tentar aquecer o pneu durante 20 minutos e só após esse tempo iniciar o registo de dados, bem como encontrar uma solução mais rigorosa no controlo da temperatura mais baixa (para não estar dependente do uso do ar condicionado da sala do laboratório).

Em ensaios com o uso da carga adicional sobre a roda e em lajetas betuminosas, seria mais eficaz a medição da área de contacto, da textura e da sua profundidade média, através de tecnologia laser, aumentando assim o rigor da análise dessa propriedade.

Nas misturas betuminosas também seria importante fazerem-se ensaios de desempenho (módulo de rigidez e resistência à fadiga e à deformação perante) para garantir que são duráveis, pois para um pavimento ser sustentável deve também ser resistente ao longo da sua vida.

Para se avaliar o efeito do tipo de pneu, dever-se-ia realizar ensaios com pneus idênticos aos que se utiliza nos veículos, sabendo que teria de se efetuar ensaios à escala real, ou num protótipo recentemente desenvolvido no Laboratório de Pavimentos Rodoviários da Universidade do Minho, que permite medir a interação do pneu com o pavimento com movimento contínuo, pois os consumos por ciclo registados no ensaio de pista podem variar. Se for possível ensaiar o mesmo tipo de mistura em ambos os equipamentos poderá ser possível estabelecer correlações entre os resultados obtidos de modo a validar o procedimento utilizado neste trabalho.

A análise da sustentabilidade de diferentes materiais poderia depois ser realizada com análises do ciclo de vida de determinadas soluções, tendo por base os resultados obtidos no presente estudo em termos comparativos, para aferir a maior ou menor contribuição de uma determinada camada de desgaste para a redução do consumo dos veículos, de modo a melhorar a sustentabilidade global da solução construtiva.

**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- ACEA (2011). *Statistics - Trends in New Car Characteristics, Diesel Vehicles in New Vehicles Sales*.
- Alam, M.S., McNabola, A. (2014). A critical review and assessment of Eco-Driving policy & technology: Benefits & limitations, *Transport Policy*, Vol. 35, pp. 42-49.
- Anderson, K., Uhlmeier, J., Sexton, T., Russel, M., Weston, J. (2012). *Performance of Concrete Pavements with Longitudinal Tining, Transverse Tining, and Carpet Drag Finish*, Washington State Department of Transportation, Olympia, Washington.
- 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.
- Atkinson, R., Barratt, B., Armstrong, B., Anderson, H., Beevers, S., Mudway, I., Green, D., Derwent, R., Wilkinson, P., Tonne, C., Kelly, F. (2009). The impact of the congestion charging scheme on ambient air pollution concentrations in London, Vol. 43 (34), pp. 5493-5500.
- Automóvel, C. (2014). *A importância dos pneus num automóvel*.
- Azevedo, M.C. (2001). A influência das características do pavimento na segurança, *1º Encontro Nacional de Segurança Viária em Meio Urbano*.
- Baptista, A., Picado-Santos, L. (2006). Reciclagem de Misturas Betuminosas a Quente em Central: contribuição para a sua caracterização mecânica, *Revista Engenharia Civil, Universidade do Minho* (nº 26).
- Bendtsen, H. (2004). *Rolling resistance, fuel consumption - a literature review*, Denmark.
- Bragança, L., Mateus, R. (2011). *Avaliação do ciclo de vida dos edifícios - impacte ambiental de soluções construtivas*, Portugal.
- Branco, F., Pereira, P., Santos, L.P. (2008). *Pavimentos Rodoviários*, Edições Almedina, SA, Coimbra.
- Cardim, A. (2012). A Avaliação do ciclo de vida dos materiais, *Forum Pernambucano de Construção Sustentável*, Pernambuco.
- Chelliah, T., Stephanos, P., Shah, M.G., Smith, T. (2003). *Developing a design policy to improve pavement surface characteristics*, Proceedings of the 82nd Annual Transportation Research Board Meeting, Washington.
- Chen, J., Lin, C., Stein, E., Hothan, J. (2004). Development of a Mechanistic-Empirical Model to Characterize Rutting in Flexible Pavements, *Journal of Transportation Engineering, American Society of Civil Engineers*.
- CIB (1999). *Agenda 21 on sustainable construction*, Report Publication 237, CIB - International Council for Research and Innovation in Building and Construction, Rotterdam, The Netherlands.
- CIB, UNEP-IETC (2002). *Agenda 21 for Sustainable Construction in Developing Countries*, WSSD ed, CSIR Building and Construction Technology, Pretoria.
- Clermont, M. (2003). *The Tyre: Rolling Resistance and Fuel Savings*, Société de Technologie.

- Corriere, F. (2010). *Gli aspetti della sostenibilità nei piani e nei programmi*, Proceedings of Conference AIIT, Rome, Italy.
- Corriere, F., Rizzo, A. (2012). Sustainability in Road Design: a Methodological Proposal for the Drafting of Guideline, *Sustainability of Road Infrastructures*, pp. 39-48.
- DeRaad, L.W. (1977). *The Influence of Road Surface Texture on Tire Rolling Resistance*, Society of Automotive Engineers.
- EAPA (2011). *Asphalt is Figures 2011*, Brussels, Belgium, European Asphalt Pavement Association;  
<http://www.eapa.org/userfiles/2/Asphalt%20in%20Figures/Asphalt%20in%20figures%2029-11-2012.pdf>.
- Ejsmont, J.A. (1990). Tire/road noise and rolling resistance – is there a trade-off? Proceedings, *International Tire/Noise Conference*, Gothenburg, Sweden.
- Ellis, J. (1989). *Road Vehicle Dynamics*, John Ellis, USA.
- Estradas de Portugal, S.A. (2009). *Caderno de Encargos Tipo Obra, Pavimentação Capítulo 1403*.
- Eurostat (2006). *Transport energy consumption and emissions*; [http://epp.eurostat.ec.europa.eu/statistics\\_explained/index.php/Transport\\_energy\\_consumption\\_and\\_emissions#Road\\_transport:\\_largest\\_emitter](http://epp.eurostat.ec.europa.eu/statistics_explained/index.php/Transport_energy_consumption_and_emissions#Road_transport:_largest_emitter); Acedido em 02/09/2014.
- Fontul, S. (2005). *Conservação e Reabilitação de Pavimentos Rodoviários*, Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- Frentress, D. (2012). *Diamond Grinding Texture Options*, International Grooving and Grinding Association, Wisconsin, United States of America.
- Gardete, D.C. (2006). *Comparação de ensaios laboratoriais para a caracterização de misturas betuminosas à deformação permanente*, Universidade de Coimbra.
- Gillespie, T. (1992). *Fundamentals of Vehicle Dynamics*, Society of Automotive Engineers, United States of America.
- Hammarstrom, U., Karlsson, R., Sorensen, H. (2009). Road surface effects on rolling resistance - coastdown measurements with uncertainty analysis in focus.
- Huang, Y., Spray, A., Parry, T. (2012). Sensitivity analysis of methodological choices in road pavement LCA, *The International Journal of Life Cycle Assessment*.
- Huang, Y.H. (1993). *Pavement Analysis and Design*, Prentice-Hall, Inc, United States of America.
- IGGA (2014). *Conserving fuel when rehabilitating concrete roads*, USA.
- INIR (2009). *Diretivas para a concepção de pavimentos - Critérios de imensionamento*.
- ISO (2006). *ISO 14040 - Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework*  
Second ed, International Organization for Standardization, Switzerland.
- Lautso, K., Spiekermann, K., Wegener, M., Sheppard, I., Steadman, P., Martino, A., Domingo, R., Gayda, S. (2004). *PROPOLIS - Planning and Research of Policies for Land Use and Transport for Increasing Urban Sustainability*, European Commission - Energy, Environment and Sustainable Development  
Thematic Programme, Europe.

- Manzie, C., Watson, H., Halgamuge, S. (2007). Fuel economy improvements for urban driving: Hybrid vs. intelligent vehicles, *Transportation Research Part C*, pp. 1-16.
- Martinez, J.E., Young, R.D. (1976). *Effects of pavement grooving on friction, braking, and vehicle control*, Washington: Federal Highway Administration.
- Meadows, D., Randers, J., Meadows, D., Behrens, W. (1972). *The Limits to Growth*, Universe Books, United States of America.
- Menzies, T., Zucchetto, J. (2006). *Tires and Passenger Vehicle Fuel Economy*, The National Academies Press, Washington, D.C.
- Milachowski, C., Stengel, T., Gehlen, C. (2011). *Life cycle assessment for road construction and use*, Centre for building materials, Technische Universität München, Brussels.
- Nathman, R.K. (2008). *Palate user guide, example exercise, and contextual discussion*, University of Delaware, Delaware, USA.
- Navarro, V.T., Gama, C.D. (2006). A sustentabilidade das obras geotécnicas, *Actas 10º Congresso Nacional de Geotecnia*, UNL, Lisboa.
- Nunes, M.S. (2010). *Avaliação da sustentabilidade de tecnologias construtivas para vãos envidraçados*, Universidade do Minho.
- Pereira, O.A. (1971). *Pavimentos Rodoviários*, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
- Pereira, P., Miranda, V. (1999). *Gestão da Conservação dos Pavimentos Rodoviários*, Universidade do Minho, Braga.
- PIARC (2000). *Pavement Surface Characteristics*, IVth International Symposium "SURF 2000", Nantes, France.
- Saboohi, Y., Farzaneh, H. (2008). Model for developing an eco-driving strategy of a passenger vehicle based on the least fuel consumption, *Elsevier - Applied Energy*.
- Sandberg, U. (2011). *MIRIAM - Rolling Resistance – Basic Information and state of the art on measurement methods*, Swedish National Road and Transport Research Institute.
- Sandberg, U., Ejsmont, J.A. (2002). *Tyre-road Noise Reference Book*, Informex, Kisa, Sweden.
- Santos, L.P., Pereira, P. (2002). *Pavimentos rodoviários*, Edição dos autores ed.
- 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*, 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*, USA.
- Stripple, H. (2001). *Life cycle assessment of road - A pilot study for inventory analysis*, Second Edition ed, IVL Swedish Environmental Research Institute, Gothenburg, Sweden.
- Thomas, M. (2014). *A política dos transportes: Generalidades*.
- Transportation, W.D.o. (2013). *Construction and Materials Manual*, United States of America.
- USDE (2014). *Fuel Economy: Where the Energy Goes*, United States Department of Energy; <http://www.fueleconomy.gov/feg/atv.shtml>; Acedido em 10-07-2014.

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 (0), pp. 86-96.

Whatne, L. (2010). Sustainability Opportunities With Pavements: Are We Focusing on the Right Stuff?, *International Conference on Sustainable Concrete Pavements*, Washington DC, USA.

Widyatmoko, I., Elliott, R. (2008). Characteristics of elastomeric and plastomeric binders in contact with natural asphalts, *Construction and Building Materials*, Vol. 22 (3), pp. 239-249.

Wong, J.Y., Wiley, J.S. (2001). *Theory of Ground Vehicles.*, Canada.