

Universidade do Minho  
Escola de Engenharia

João Manuel de Sousa Sampaio

Influência das Propriedades das Misturas  
Betuminosas na Resistência ao Rolamento

João Manuel de Sousa Sampaio Influência das Propriedades das Misturas Betuminosas na Resistência ao Rolamento

UMinho | 2012

Outubro de 2012



Universidade do Minho  
Escola de Engenharia

João Manuel de Sousa Sampaio

Influência das Propriedades das Misturas  
Betuminosas na Resistência ao Rolamento

Tese de Mestrado  
Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao  
Grau de Mestre em Engenharia Civil

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

Outubro de 2012

## **AGRADECIMENTOS**

Este trabalho é financiado por Fundos FEDER através do Programa Operacional Fatores de Competitividade – COMPETE e por Fundos Nacionais através da FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia no âmbito do projeto PTDC/ECM/119179/2010, “Desenvolvimento de materiais multifuncionais com resíduos plásticos para pavimentação de estradas – PLASTIROADS”.

A realização deste trabalho não seria possível sem a disponibilidade e o apoio de alguns intervenientes aos quais faço questão de expressar os meus sinceros agradecimentos.

À Universidade do Minho, Instituição pela qual tenho a maior consideração e admiração, e em especial ao Departamento de Engenharia Civil, por terem contribuído de uma forma crucial, não só na minha formação como Engenheiro, mas também na minha construção como Homem.

Ao meu estimado orientador, Doutor Hugo Silva, quero expressar os meus agradecimentos pela sua disponibilidade, simpatia, pelas suas sugestões competentes e os seus esclarecimentos, que se revelaram impreteríveis para a concretização desta Dissertação.

Ao meu coorientador, Doutor Joel Oliveira, pela valiosa ajuda, pela orientação e entrega, prestando um contributo muito importante para esta Dissertação.

Ao Engenheiro Carlos Palha e ao Hélder Torres, do Laboratório de Engenharia Civil, pela paciência e pela incansável dedicação, pela disponibilidade demonstrada e ainda pelos conhecimentos transmitidos principalmente a um nível laboratorial.

Agradeço também à FISIFE, à Cepsa e à pedreira Bezerras pela disponibilização do material que foi importante para a realização deste estudo.

Aos meus colegas de curso, em especial do perfil de Planeamento e Infraestruturas de Transporte, pelo companheirismo e amizade que resultaram deste percurso marcante.

Por fim privilegio um profundo e sentido reconhecimento aos meus pais, João e Jacinta, pelo infindável apoio, pela inabalável fé em mim e pelo interminável encorajamento nos momentos mais difíceis, que sendo eles os pilares da minha educação e formação, são os responsáveis por terem tornado possível a minha caminhada até à finalização da minha formação superior.



## **Influência das Propriedades das Misturas Betuminosas na Resistência ao Rolamento**

### **RESUMO**

Os impactos ambientais associados às estradas começam a ser vistos não só pela sua construção e manutenção, mas também pelo seu período de utilização, nomeadamente os impactos causados pelo tráfego rodoviário. As entidades governamentais têm realizado esforços no sentido de mitigar esses impactos ambientais, onde está inserido o uso eficiente dos recursos limitados, designadamente a energia proveniente de combustíveis fósseis. Este trabalho apresenta um estudo laboratorial dos consumos energéticos associados à resistência ao rolamento no contacto pneu/pavimento. Estudos recentes têm demonstrado que as características dos pavimentos rodoviários podem influenciar a economia de combustível, sendo que os pavimentos de rugosidade elevada originam consumos de combustível mais altos, enquanto os pavimentos mais rígidos podem economizar cerca de 2% de energia em relação aos pavimentos flexíveis.

Neste trabalho pretende-se propor um método laboratorial relativamente simples que consiga estudar o contributo que as características mecânicas e superficiais das misturas betuminosas têm na resistência ao rolamento dum pneu em contacto com a mistura.

Deste modo, produziram-se três misturas que diferem nos parâmetros de rigidez e de textura: um betão betuminoso, um betão betuminoso com ligante modificado com polietileno (PEAD) e um betão betuminoso rugoso ou *stone mastic asphalt* (SMA). Em seguida, procedeu-se a ensaios de caracterização das misturas betuminosas, destacando-se o ensaio de mancha de areia, o ensaio de pêndulo britânico e o ensaio de módulo de rigidez. Finalmente, a resistência ao rolamento foi obtida no equipamento do ensaio de pista (*wheel tracking test*), onde foi instalado um multímetro com capacidade de realizar leituras da potência elétrica consumida nos ensaios. Para além dessas misturas betuminosas, foram ensaiados materiais de calibração que evidenciam os parâmetros em estudo.

Analisando os resultados verificou-se que o método adotado para a leitura de consumos energéticos devido à resistência ao rolamento não revelou diferenças claras nos consumos de energia para materiais com diferente rigidez. Ao nível da textura, verificou-se que a área de contacto entre o pneu e a superfície foi o fator com mais influência nos consumos.

**PALAVRAS-CHAVE:** Mistura betuminosa, Resistência ao rolamento, Consumo energético, Textura, Módulo de rigidez, Contacto pneu/pavimento.

## **Influence of the Properties of the Asphalt Mixtures on the Rolling Resistance**

### **ABSTRACT**

The environmental impacts associated to roads are starting to be considered not only according to their construction and maintenance, but also according to their use, including the impacts caused by road traffic. Governmental authorities have been struggling to reduce those environmental impacts, which include an efficient use of limited resources, namely fossil fuel-based power. This work presents a laboratory study regarding the energy consumption related to rolling resistance in the tire/pavement contact. Recently conducted studies have shown that the differences in pavement characteristics may have an influence in fuel saving. A very rough pavement is generally associated with higher fuel consumption, while the rigid pavements can save up to 2% of energy when compared to a flexible pavement.

This work aims to study the contribution that mechanical and superficial characteristics of the asphalt mixtures have on the tire's rolling resistance when in contact with the mixture by using a relatively simple laboratory procedure proposed in this work.

Thus, three different mixtures with different stiffness modulus and texture patterns were produced: a asphalt concrete, a asphalt concrete with polyethylene modified binder (HDPE) and finally a stone mastic asphalt (SMA). Then, tests were carried out regarding the characterization of the asphalt mixtures, in which the sand patch test, the British pendulum test and the stiffness modulus test must be highlighted. Finally, the rolling resistance was obtained in the wheel tracking test, in which a multimeter capable of reading electric power during the tests was installed. In addition to these asphalt mixtures, calibration materials that provide evidence of this study's parameters were also tested.

When analyzing the results of the tests, it was noticed that the method used to determine rolling resistance, when reading the energy consumption, did not show clear differences for materials with different stiffness levels. Concerning the texture, it was noticed that the contact area between the tire and the surface was the most influential factor in the consumptions.

**KEYWORDS:** Asphalt mixture, Rolling resistance, Energy consumption, Texture, Stiffness modulus, Tire/pavement contact

## ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO .....	1
1.1	Enquadramento temático .....	1
1.2	Objetivo .....	3
1.3	Conteúdo e metodologia .....	4
2	REVISÃO DO ESTADO DA ARTE .....	5
2.1	Sustentabilidade .....	5
2.1.1	Políticas e desafios .....	6
2.1.2	Sustentabilidade na construção civil .....	7
2.1.3	Sustentabilidade na construção rodoviária .....	9
2.1.4	Uso da energia e alternativas .....	10
2.1.5	Eco-Condução .....	13
2.2	Resistência ao rolamento .....	14
2.2.1	Contacto pneu-pavimento .....	15
2.2.2	Avaliação da resistência ao rolamento .....	17
2.2.3	Resistência ao movimento do veículo .....	18
2.3	Influência da infraestrutura rodoviária na resistência ao rolamento .....	18
2.3.1	Generalidades das misturas betuminosas .....	19
2.3.2	Influência da textura .....	21
2.3.3	Influência da rigidez .....	26
2.4	Fatores que influenciam os consumos de combustível .....	27
2.4.1	Contribuição da aerodinâmica .....	27
2.4.2	Contribuição dos pneus .....	27
2.4.3	Contribuição da velocidade e do comportamento do condutor em cenários de condução urbana e em via rápida .....	29
2.4.4	Ações sobre os materiais .....	31

2.5	Relação entre a resistência ao rolamento e o consumo energético .....	32
2.6	Influência da resistência ao rolamento na segurança rodoviária e ruído.....	34
2.6.1	Conceito de tração .....	35
2.6.2	Aderência do pavimento rodoviário .....	36
3	MATERIAIS E MÉTODOS .....	39
3.1	Introdução.....	39
3.2	Formulação e produção das misturas betuminosas .....	40
3.3	Caracterização dos betumes .....	45
3.4	Análise volumétrica das misturas betuminosas.....	45
3.5	Caracterização superficial das misturas betuminosas .....	47
3.5.1	Mancha de areia .....	48
3.5.2	Pêndulo Britânico .....	49
3.6	Caracterização do módulo de rigidez das misturas betuminosas .....	50
3.7	Ensaio desenvolvido para avaliação da resistência ao rolamento .....	51
3.7.1	Metodologia adotada no ensaio da resistência ao rolamento.....	51
3.7.2	Leitura e tratamento de dados dos consumos energéticos .....	55
3.7.3	Metodologia da análise ao ensaio de resistência ao rolamento .....	58
3.8	Estudo da influência da temperatura na resistência ao rolamento .....	60
3.9	Caracterização dos materiais de calibração.....	61
3.9.1	Viga metálica lisa .....	62
3.9.2	Superfície de borracha .....	62
3.9.3	Superfície rugosa (chapa-xadrez) .....	63
3.9.4	Rede metálica.....	64
3.9.5	Superfície inclinada .....	65
3.10	Metodologia de determinação de textura localizada .....	66
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	69



4.1	Caracterização dos materiais .....	69
4.1.1	Mancha de areia .....	69
4.1.2	Pêndulo britânico.....	70
4.1.3	Módulo de rigidez .....	70
4.2	Considerações gerais sobre a determinação da resistência ao rolamento com base no consumo energético .....	73
4.3	Análise individual da influência de alguns parâmetros nos consumos energéticos .....	77
4.3.1	Módulo de rigidez .....	77
4.3.2	Rugosidade e atrito.....	82
4.4	Análise da influência do aumento da temperatura nos consumos energéticos .....	86
4.5	Análise geral dos ensaios de resistência ao rolamento .....	90
4.6	Alterações na textura no ensaio de resistência ao rolamento .....	91
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	93
5.1	Conclusões .....	93
5.2	Trabalhos futuros .....	95
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	97



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Nova abordagem da sustentabilidade num contexto global (adaptado de CIB (1999)).	8
Figura 2 - Distribuição do consumo mundial de energia primária, por fontes de energia no ano de 2006 (adaptado de Occam (2010)).	9
Figura 3 - Quantidade de petróleo importado nos EUA, em comparação com a quantidade que é produzida nesse mesmo país nos últimos 40 anos, em milhões de barris por dia.	12
Figura 4 - Representação esquemática das deformações impostas aos pneus de um veículo, assim como a deflexão das paredes laterais (adaptado de (Gent e Walter, 2006)).	16
Figura 5 - Correlação da resistência ao rolamento, com a profundidade média da textura de um pavimento (adaptado de Descornet (1990)).	16
Figura 6 - Equipamentos denominados de “tambor” e de “correias planas”, para medir a resistência ao rolamento no contacto pneu/pavimento (adaptado de Sandberg e Ejsmont (2000) e Gent e Walter (2006)).	17
Figura 7 - Representação esquemática do sistema multi-estratificado que constitui um pavimento rodoviário (InIR, 2009).	19
Figura 8 - Exemplos simplificados de diferentes tipos de texturas num pavimento rodoviário (adaptado de Sandberg (2002)).	22
Figura 9 - Diferentes gamas de análise da textura de um pavimento rodoviário frequentemente utilizadas (AIPCR/PIARC, 2003).	22
Figura 10 - Esquema para determinação da altura média pelo método volumétrico da mancha.	23
Figura 11 - Esquema representativo da profundidade média estimada da textura (Schmidt e Ullidtz, 2010).	24
Figura 12 - Variação da resistência ao rolamento do pneu com a textura superficial do pavimento (adaptado de DeRaad (1977)).	25
Figura 13 - Exemplo da perda de energia para um modelo de veículo de passageiros médio em condução urbana (adaptado de USDE (2012)).	30
Figura 14 - Exemplo da perda de energia para um modelo de veículo de passageiros médio em via-rápida (adaptado de USDE (2012)).	30
Figura 15 - Representação esquemática da formação de ondas permanentes nos pneus (adaptado de Wong (2001)).	31

Figura 16 - Efeito na energia consumida em percentagem, em função das alterações na resistência ao rolamento (adaptado de Bendtsen (2004)).	33
Figura 17 - Exemplo da influência das alterações na resistência ao rolamento no consumo de combustível de um veículo médio de passageiros (adaptado de Sandberg (2002)).	34
Figura 18 - Pêndulo britânico.	37
Figura 19 - Curva granulométrica da mistura de agregados das misturas AC14 e AC14PEAD e o fuso granulométrico adotado.	42
Figura 20 - Curva granulométrica da mistura de agregados do betão betuminoso rugoso e o fuso granulométrico adotado.	43
Figura 21 - Polietileno de alta densidade (PEAD) utilizado na modificação do betume para a mistura AC14PEAD.	43
Figura 22 - Fibras acrílicas utilizadas na mistura betuminosa SMA.	44
Figura 23 – Equipamento utilizado para aquecimento do betume.	45
Figura 24 - Resultados do ensaio de viscosidade rotacional.	46
Figura 25 - Lajetas resultantes das misturas betuminosas produzidas.	46
Figura 26 - Vigas resultantes de cada laje de mistura betuminosa produzida.	46
Figura 27 - Aspeto da superfície das lajetas resultantes das misturas betuminosas.	48
Figura 28 – Aplicação do método do ensaio de mancha de areia.	49
Figura 29 – Aplicação do método do ensaio de pêndulo britânico.	50
Figura 30 - Termómetro de infravermelhos para verificação das temperaturas.	50
Figura 31 - Esquema do ensaio de pista (WTT) sem carga adicional.	52
Figura 32 - Esquema do ensaio WTT com carga adicional.	52
Figura 33 - Ensaio de pista ou <i>Wheel Tracking Test</i> .	52
Figura 34 - Potenciómetro utilizado para avaliar a posição da laje no ensaio.	53
Figura 35 - Esquema do emparelhamento de equipamentos para a realização do ensaio.	54
Figura 36 - Multímetro convencional usado para verificação.	54
Figura 37 - Curva sinusoidal típica de um ciclo elétrico.	55
Figura 38 - <i>Software</i> desenvolvido no programa <i>LabView</i> para aquisição de dados.	56
Figura 39 - Exemplo do comportamento da curva dos consumos energéticos e do movimento da mesa (medida com o potenciómetro) num ensaio WTT.	57
Figura 40 - Cálculo da energia consumida pela área abaixo do gráfico.	58

Figura 41 - Exemplo de um ensaio sem contacto da roda com a superfície do material. ....	59
Figura 42 - Exemplo de um ensaio com a representação do consumo total onde a roda está em contacto com a superfície do material. ....	60
Figura 43 - Ensaio de resistência ao rolamento com aquecimento. ....	61
Figura 44 - Ensaio realizado sobre uma viga em alumínio de superfície lisa. ....	62
Figura 45 - Membrana de borracha utilizada no ensaio. ....	63
Figura 46 - Chapa-xadrez utilizada no ensaio. ....	63
Figura 47 - Dimensões dos losangos da chapa-xadrez (mm). ....	64
Figura 48 - Ensaio de mancha de areia realizado na chapa-xadrez. ....	64
Figura 49 - Rede metálica utilizada no ensaio WTT (medidas em mm). ....	65
Figura 50 - Esquema de ensaio utilizado para superfícies inclinadas. ....	65
Figura 51 - Viga de alumínio com 1% de inclinação. ....	66
Figura 52 - Viga de alumínio com 2,75% de inclinação. ....	66
Figura 53 - Ensaio de mancha de areia localizada. ....	66
Figura 54 - Massa do recipiente com as esferas de vidro antes e após o espalhamento. ....	67
Figura 55 - Módulo de rigidez das misturas betuminosas a uma temperatura de 10 °C. ....	71
Figura 56 - Módulo de rigidez das misturas betuminosas a uma temperatura de 20 °C. ....	71
Figura 57 - Módulo de rigidez das misturas betuminosas a uma temperatura de 30 °C. ....	71
Figura 58 - Ângulo de fase das misturas betuminosas a uma temperatura de 10 °C. ....	72
Figura 59 - Ângulo de fase das misturas betuminosas a uma temperatura de 20 °C. ....	72
Figura 60 - Ângulo de fase das misturas betuminosas a uma temperatura de 30 °C. ....	73
Figura 61 - Exemplo do registo dos consumos num dos ensaios realizados. ....	74
Figura 62 - Exemplo do mecanismo <i>Scotch Yoke</i> usado no equipamento deste trabalho. ....	74
Figura 63 - Influência do aumento de carga sobre a roda no consumo medido. ....	75
Figura 64 - Comportamento da curva de consumo de energia no ensaio com rede metálica. ....	76
Figura 65 - Comportamento da curva de consumo energético na superfície inclinada. ....	76
Figura 66 - Consumos de energia devido à resistência ao rolamento de materiais com diferente rigidez no ensaio sem aplicação de peso. ....	78
Figura 67 - Deformação da borracha imposta pelas repetidas passagens da roda. ....	79

Figura 68 - Comparação do consumo médio devido à resistência ao rolamento de materiais com diferente rigidez no ensaio sem aplicação de peso. ....	79
Figura 69 - Consumos de energia devido à resistência ao rolamento de materiais com diferente rigidez no ensaio com aplicação de peso. ....	80
Figura 70 - Comparação do consumo médio devido à resistência ao rolamento de materiais com diferente rigidez no ensaio com aplicação de peso. ....	81
Figura 71 - Consumos de energia devido à resistência ao rolamento de materiais com diferentes características superficiais no ensaio sem aplicação de peso. ....	83
Figura 72 - Comparação do consumo médio devido à resistência ao rolamento de materiais com diferentes características superficiais no ensaio sem aplicação de peso. ....	84
Figura 73 - Consumos de energia devido à resistência ao rolamento de materiais com diferentes características superficiais no ensaio com aplicação de peso. ....	85
Figura 74 - Comparação do consumo médio devido à resistência ao rolamento de materiais com diferentes características superficiais no ensaio com aplicação de peso. ....	86
Figura 75 - Evolução do consumo energético por resistência ao rolamento em função da temperatura na mistura AC14. ....	88
Figura 76 - Evolução do consumo energético por resistência ao rolamento em função da temperatura na mistura AC14PEAD. ....	88
Figura 77 - Evolução do consumo energético por resistência ao rolamento em função da temperatura na mistura SMA. ....	88
Figura 78 - Energia consumida por resistência ao rolamento com e sem aquecimento. ....	89
Figura 79 - Resultados do ensaio de resistência ao rolamento de todos os materiais. ....	90
Figura 80 - Resultados da profundidade média da textura obtidos pelo método de determinação da textura localizada. ....	91

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Ficha técnica das fibras <i>asphalt+</i> utilizadas na produção da mistura SMA (adaptado de FISIFE (2012)).	41
Tabela 2 - Análise granulométrica dos agregados utilizados (norma EN 933-1).	41
Tabela 3 - Percentagem de cada fração de agregados utilizados nas misturas AC14 e AC14PEAD.	42
Tabela 4 - Percentagem de cada fração de agregados utilizados na mistura SMA.	42
Tabela 5 – Percentagem de betume das misturas betuminosas produzidas neste estudo.	44
Tabela 6 - Caracterização dos betumes utilizados nas misturas betuminosas.	45
Tabela 7 - Parâmetros volumétricos dos elementos obtidos das misturas produzidas.	47
Tabela 8 - Profundidade média de textura no ensaio de mancha de areia.	69
Tabela 9 - Resultados do ensaio do pêndulo britânico.	70
Tabela 10 - Módulos de rigidez e ângulos de fase das misturas betuminosas.	73
Tabela 11 - Consumos de energia devido à resistência ao rolamento de materiais com diferente rigidez no ensaio sem aplicação de peso.	77
Tabela 12 - Relação entre os consumos (resistência ao rolamento) dos materiais com diferente rigidez no ensaio sem aplicação de peso.	80
Tabela 13 - Consumos de energia devido à resistência ao rolamento de materiais com diferente rigidez no ensaio com aplicação de peso.	80
Tabela 14 - Relação entre os consumos (resistência ao rolamento) dos materiais com diferente rigidez no ensaio com aplicação de peso.	82
Tabela 15 - Consumos de energia devido à resistência ao rolamento de materiais com diferentes características superficiais no ensaio sem aplicação de peso.	82
Tabela 16 - Relação entre os consumos (resistência ao rolamento) dos materiais com diferentes características superficiais no ensaio sem aplicação de peso.	84
Tabela 17 - Consumos de energia devido à resistência ao rolamento de materiais com diferentes características superficiais no ensaio com aplicação de peso.	84
Tabela 18 - Relação entre os consumos (resistência ao rolamento) dos materiais com diferentes características superficiais no ensaio com aplicação de peso.	86
Tabela 19 - Evolução da deformação e temperatura no decorrer do ensaio de resistência ao rolamento com aquecimento da mistura AC14.	86

Tabela 20 - Evolução da deformação e temperatura no decorrer do ensaio de resistência ao rolamento com aquecimento da mistura AC14PEAD.....	87
Tabela 21 - Evolução da deformação e temperatura no decorrer do ensaio de resistência ao rolamento com aquecimento da mistura SMA. ....	87
Tabela 22 - Consumos de energia por resistência ao rolamento no ensaio com aquecimento. ....	87
Tabela 23 - Resultados da altura média de areia das várias misturas e lajes. ....	91



# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Enquadramento temático

A tecnologia dos pavimentos rodoviários afigura-se no presente, de grande importância para o desenvolvimento socioeconómico das regiões. No entanto, se até há algum tempo atrás importava construir ao menor custo atualmente existe uma visão muito mais ampla sobre esta matéria, valorizando-se a perspectiva ambiental e procurando-se determinar todos os impactos (económicos, ambientais, ou outros) a longo prazo.

Sendo as vias de comunicação infraestruturas cuja construção e manutenção provoca impactos ambientais consideráveis torna-se indispensável a procura de novas técnicas e processos, com vista à mitigação das suas consequências negativas.

A qualidade superficial exigida aos pavimentos rodoviários tem-se baseado essencialmente na segurança e comodidade dos utentes das estradas. No entanto, esta preocupação não visa as contribuições ambientais que a camada de desgaste pode determinar pelas suas características. Um desperdício de recursos e um maior índice de poluição ambiental pode revelar-se ao excluirmos o estudo destas contribuições.

A energia é um recurso que se traduz num dos principais motores de desenvolvimento das sociedades atuais. A noção de que os recursos que a humanidade tem usado não são ilimitados tem levado à implementação de práticas mais sustentáveis. Cada vez mais se caminha no sentido de recorrer a boas práticas ambientais, nomeadamente aplicadas à construção de infraestruturas de apoio à atividade humana, tais como as infraestruturas rodoviárias. Para avaliar a sustentabilidade de uma estrada torna-se necessário definir uma escala de avaliação, onde constem parâmetros relacionados com a sua construção/conservação e parâmetros relacionados com a sua exploração, como a resistência ao rolamento.

As vias de comunicação envolvem o uso de grandes quantidades de energia. Para além da energia necessária na sua construção e manutenção, o avanço da ciência, as questões sociais e ambientais direcionam atualmente a atenção em torno da energia associada ao tráfego rodoviário, nomeadamente o consumo de combustível no período de utilização da própria via.

A intensificação dos padrões de consumo tem provocado um aumento do consumo de energia à escala mundial que é cada vez mais insustentável do ponto de vista económico e ambiental.

Atualmente, um dos problemas ambientais mais graves é o efeito de estufa e o consequente aumento da temperatura média da superfície da Terra, isso torna a gestão da energia urgente, sendo esse um dos maiores desafios da atualidade uma vez que os impactos negativos associados ao consumo excessivo dos recursos estão a prejudicar não só as populações humanas mas todos os ecossistemas.

A maioria das fontes de energia utilizada na mobilidade rodoviária é proveniente do petróleo, e este é um combustível fóssil que se encontra na natureza em quantidades limitadas. A crescente dependência dos transportes privados e o aumento do número de viagens por passageiro tem originado graves problemas sociais, económicos e ambientais, nomeadamente o consumo ineficiente de energia no sector dos transportes (Occam, 2010).

Em Portugal, no ano de 2009, foram consumidas 6.164.623 toneladas equivalentes de petróleo (tep) em combustíveis (INE, 2010). Em 2008 o sector dos transportes era responsável por 28% do consumo total de energia final (Occam, 2010). Os impactos numa redução do consumo de combustível podem se tornar claramente significativos num contexto global.

O interesse pelo estudo da economia de combustíveis começou a ganhar relevo nos anos 70, altura em que começaram a ser implementadas políticas com objetivos fundamentados na conservação de energia (Menzies e Zucchetto, 2006). A Comissão Europeia definiu recentemente estratégias com o objetivo de reduzir o consumo de energia e as emissões de CO<sub>2</sub>. Novos tipos de materiais, novas técnicas de pavimentação e novas investigações, relacionadas com as propriedades das misturas betuminosas incorporam essas estratégias. (Schmidt e Ullidtz, 2010).

Com a finalidade de estimar o consumo de energia realizado pelo tráfego rodoviário, a influência das condições da superfície do pavimento na resistência ao rolamento e no consumo de energia revela-se de alta importância (Hammarstrom *et al.*, 2009). Têm sido realizados estudos por investigadores ao nível da resistência ao rolamento, estimando quanto combustível se pode economizar num veículo, se este for dirigido num pavimento de rugosidade mais baixa (Amos, 2006). 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. Nesta análise pôde-se verificar ganhos na ordem de 2% na economia de combustível (Schmidt e Ullidtz, 2010).

Uma pequena variação no consumo de combustível numa escala individual pode-se revelar em diferenças relevantes num contexto global de milhões de veículos que compõe o tráfego numa via rodoviária ao longo de um determinado período de tempo, pondo em jogo a sustentabilidade ambiental no planeta.

Sendo o ensaio de pista (conhecido na terminologia anglo-saxónica por *Wheel Tracking Test*) um ensaio simples, que simula o rolamento de um pneu num pavimento rodoviário, embora este ensaio tenha convencionalmente outro fim, pode-se de forma simplificada realizar algumas analogias com o consumo de combustível de um veículo real numa situação de condução real, relacionado com a variação das condições de circulação, nomeadamente, as características de superfície, através da realização de ensaios desse tipo. Deste modo, com o presente trabalho procurou aproveitar-se os recursos do laboratório de vias de comunicação da Universidade do Minho para desenvolver um método que poderá ser visto como um ponto de partida para alcançar conclusões mais significativas no que diz respeito ao estudo da influência das propriedades das misturas betuminosas na resistência ao rolamento.

## 1.2 Objetivo

O objetivo geral deste trabalho consiste em avaliar o consumo energético associado à resistência ao rolamento na movimentação dos veículos rodoviários em função dos diferentes tipos de misturas betuminosas existentes no pavimento. Uma vez que a medição direta dos consumos num cenário de condução real implicaria uma mobilização de meios humanos e financeiros e um período de tempo que não se adequa às condições existentes para a realização de uma Dissertação de Mestrado Integrado, neste trabalho não se pretendeu avaliar diretamente o consumo de energia de um veículo mas sim realizar um estudo baseado em analogias através de um método laboratorial.

Assim, produziram-se três misturas betuminosas passíveis de serem analisadas comparativamente segundo as suas diferentes propriedades, tendo-se obtido lajetas que se diferenciam nos parâmetros que são alvo do estudo. Essas misturas betuminosas são um betão betuminoso convencional, um betão betuminoso com betume modificado com polietileno de alta densidade (PEAD) e um betão betuminoso rugoso, em que se adicionaram fibras acrílicas, podendo também ser designado por *stone mastic asphalt* (SMA). Para estudar a influência das suas características no consumo de energia associado à passagem de uma roda na superfície das misturas, foi necessário determinar as propriedades destas misturas através dos ensaios convencionais ao nível da sua caracterização superficial e mecânica.

Neste trabalho considerou-se fundamental a avaliação de 2 parâmetros associados aos pavimentos rodoviários, procurando tendências na sua contribuição para a resistência ao rolamento e conseqüente consumo energético, sendo eles, a macrotextura ou rugosidade, e a rigidez, representada pelo módulo de deformabilidade.

Este trabalho também tem como objetivo a definição de uma metodologia que se prove válida, para o tipo de avaliação referido e que permita uma análise comparativa entre as propriedades em estudo, sendo esta metodologia apoiada no equipamento laboratorial utilizado no ensaio de pista (*Wheel Tracking Test*).

### **1.3 Conteúdo e metodologia**

No Capítulo 1 descreve-se o enquadramento teórico do tema, fazendo-se referência ao trabalho que tem sido realizado em prol do conhecimento científico associado à redução do consumo de combustíveis no tráfego rodoviário. É também referida a importância que o desenvolvimento do tema tem num contexto global. Em seguida são apresentados os objetivos deste trabalho e qual o seu contributo para o desenvolvimento do tema.

O Capítulo 2 representa o estado da arte. Este capítulo contém conceitos de sustentabilidade, nomeadamente na construção rodoviária, boas políticas e práticas ambientais, descrevendo-se resumidamente a ciência inerente à resistência ao rolamento no contacto pneu/pavimento e ainda a influência que esta possa ter nos consumos energéticos dos veículos que constituem o tráfego rodoviário. Por fim são feitas ainda algumas referências à questão da segurança na aderência do pneu ao pavimento rodoviário.

No Capítulo 3 é referida a componente experimental e as metodologias utilizadas no âmbito da realização do estudo. São referidas as normas estipuladas para as caracterizações realizadas e é realizada uma descrição pormenorizada dos métodos utilizados para a realização dos ensaios e para o tratamento dos resultados obtidos.

Finalmente foi feita uma análise extensiva dos resultados obtidos, comparando o comportamento das diferentes misturas betuminosas submetidas ao estudo (Capítulo 4), o que permitiu chegar às conclusões apresentadas no Capítulo 5.

## 2 REVISÃO DO ESTADO DA ARTE

### 2.1 Sustentabilidade

A verdadeira definição de sustentabilidade tem divergido recentemente no entendimento do seu conceito pelo seu uso excessivo e por ventura indevido em alguns casos, provavelmente devido à ampla abrangência e evolução que este possa ter (CIB, 1999).

O conceito de “Desenvolvimento Sustentável” foi definido no relatório de Brundtland em 1987 como, o desenvolvimento que procura satisfazer as necessidades do presente, sem comprometer a capacidade das gerações futuras satisfazerem as suas próprias necessidades (Whatne, 2010).

A partir dessa altura as definições de sustentabilidade têm-se apoiado nessa base mas no entanto podendo apresentar várias formas, isto deve-se à sua vasta abrangência e ao percurso evolutivo que a sustentabilidade tem tomado nas últimas décadas acompanhando a evolução das sociedades.

Uma das definições atribuídas ao desenvolvimento sustentável foi feita pela *International Union for Conservation of Nature* (IUCN) em 1991 e consiste na melhoria da qualidade de vida humana, adotando a capacidade de suportar os ecossistemas (CIB, 1999).

Em 1996 o plano da “Agenda 21” define 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” (CIB, 1999).

A organização norte-americana *Construction Engineering Research Foundation* (CERF) definiu desenvolvimento sustentável como “o desafio de satisfazer as necessidades humanas para os recursos naturais, produtos industriais, energia, alimentos, transporte, gestão eficiente do tratamento de resíduos e locais para a sua colocação, enquanto se conserva e protege a qualidade ambiental e os recursos naturais para o desenvolvimento futuro” (CIB, 1999).

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).

Desta forma foi possível perceber que a sustentabilidade não tem uma única e inequívoca definição, tendo sido definida de forma diferente por várias organizações, tendo em conta o contexto temporal e a realidade de cada local de intervenção. Acontece que o próprio conceito de sustentabilidade, nomeadamente de sustentabilidade na construção, tem vindo a sofrer alterações no seu entendimento e interpretação ao longo das últimas décadas (CIB, 1999), apoiando-se e ao mesmo tempo adaptando-se aos contextos sociais, políticos e económicos que paralelamente têm vindo a evoluir, logo é natural que as preocupações ao nível de ações que promovam a sustentabilidade sejam também hoje diferentes, mais completas e complexas, contribuindo assim para ligeiras divergências no entendimento geral do conceito. É portanto um conceito que se reorganiza e reformula em função da evolução das sociedades, tendo como pilares o ambiente, a sociedade e a economia (EPA, 2012b).

Como já foi referido, as preocupações ambientais têm sido alargadas nas últimas décadas, estendendo a sustentabilidade a uma definição mais complexa. Inicialmente o compromisso ambiental baseava-se em reagir a catástrofes com clara visibilidade, como o aparecimento de peixes mortos junto às margens (CIB 1999). Avançando no tempo, lentamente foi-se compreendendo que o consumo excessivo ou ineficiente de recursos é na verdade nada mais nada menos que um abuso do meio ambiente (CIB 1999).

Hoje o termo em causa é aplicado de forma ampla a quase todos os aspetos, embora tenha vindo a ser cada vez mais utilizado num contexto de sustentabilidade humana na Terra (Whatne, 2010).

### **2.1.1 Políticas e desafios**

As divergências no entendimento e interpretação do conceito de sustentabilidade está também relacionado com as diferenças existentes entre países, uns com economias de mercado desenvolvidas, outros com economias transitórias e ainda países em desenvolvimento, tendo as economias mais maduras mais capacidade para dedicarem maior atenção à promoção da sustentabilidade.

Tendo isto em conta, pode dizer-se que optar por promover a sustentabilidade, visa a qualidade e o bem-estar da vida humana e natural dentro de cada contexto social existente, o que se revela numa questão política e de idoneidade. As entidades políticas tornam-se então, as principais responsáveis por desenvolver estratégias de sustentabilidade para o progresso equilibrado das sociedades.

Tendo a construção um papel muito influente no consumo de recursos e nos impactos no ambiente, as políticas de sustentabilidade são maioritariamente dirigidas a essa mesma área. Um dos principais desafios da indústria ligada à construção é a reformulação dos processos construtivos, que tem como principais barreiras a defesa do *status quo*, a medíocre compreensão dos problemas, a ausência de meios para a participação, o atraso no mercado e recolha insuficiente de dados, e ainda a carência de comunicação e insegurança política (CIB, 1999).

Ao nível do ambiente, para a APA (2012), Agência Portuguesa do Ambiente, uma política de ambiente deve ser entendida como um conjunto de princípios e ideias, de conceção e formalização dinâmicas, consubstanciando num texto que oriente e enquadre a definição de objetivos e de linhas de atuação, coerentes e estruturados, no domínio do ambiente, consagrando a sua própria evolução perante novos desafios e problemas.

Uma política de ambiente constitui um referencial do cumprimento de objetivos, leis, normas e instrumentos que dela emanam, consagrando o direito e o dever de todos os cidadãos participarem na sua construção (APA, 2012).

Segundo CIB (1999), o progresso no âmbito da construção sustentável depende essencialmente de três assuntos de base. Esses assuntos são as responsabilidades da indústria, aspetos a clarificar e as barreiras a enfrentar. Adotar políticas de direitos éticos e humanos, assim como políticas educativas é um meio importante para que se superem algumas barreiras, a especialização em questões ambientais é necessária entre projetistas e Engenheiros Cívicos (CIB, 1999).

### **2.1.2 Sustentabilidade na construção civil**

A indústria da construção e o ambiente construído devem ser duas áreas chave a serem tidas em conta se o objetivo for o de alcançar o desenvolvimento sustentável nas sociedades, pois o ambiente construído constitui um dos principais suportes para o desenvolvimento económico e o bem-estar social (CIB, 1999).

A estratégia de sustentabilidade de uma obra é um projeto indefinido e eterno, que surge da monitorização periódica e dinâmica de vários parâmetros, cujos valores se traduzem em planos de ação renovados e cada reavaliação, ou seja, reajustados à realidade existente (Borrego *et al.*, 2009).

É sabido que a indústria da construção é uma grande consumidora de materiais que são fabricados com consumo intensivo de energia. A construção civil está a contribuir para o esgotamento de recursos não renováveis, através do consumo de materiais que são usados em grande escala (CIB, 1999).

Originalmente na construção sustentável era dada ênfase a como lidar com as questões da limitação dos recursos, especialmente a energia, e como reduzir os impactos no ambiente. Depois foi dada importância às questões mais técnicas da construção como os materiais, componentes construtivas, tecnologias utilizadas na construção e energia relacionada com os conceitos de projeto. Mais recentemente, uma apreciação da significância das questões não-técnicas tem vindo a crescer e apercebendo-se que as chamadas questões “soft” são cruciais para o desenvolvimento sustentável na construção (CIB, 1999). Assim, também as questões culturais e as implicações da herança cultural do ambiente construído têm vindo a ser considerados como aspetos preeminentes na construção sustentável (CIB, 1999).

Na Figura 1 é ilustrada a forma como a engenharia tradicional pode integrar um contexto mais amplo e complexo quando os requisitos ambientais são considerados.

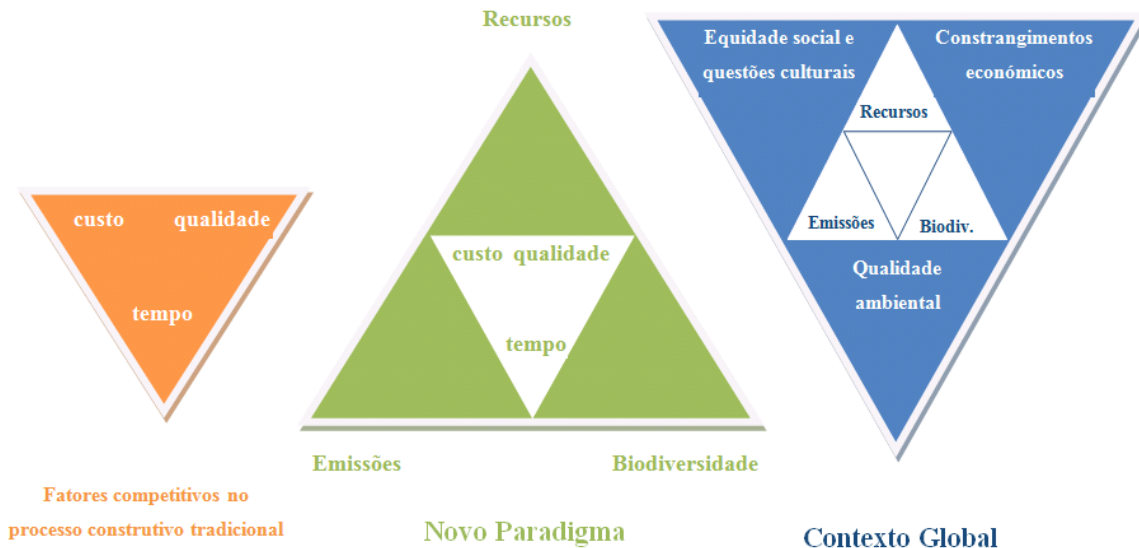


Figura 1 - Nova abordagem da sustentabilidade num contexto global (adaptado de CIB (1999)).

Neste exemplo é visível que a adoção de políticas e novas metodologias integram atualmente a construção de modo a favorecer a sua sustentabilidade. As questões económicas e socioculturais estão presentes no contexto global junto com as questões ambientais.



### 2.1.3 Sustentabilidade na construção rodoviária

As infraestruturas rodoviárias são por natureza obras de grande impacto ambiental, tanto em projeto como no seu processo de construção. Elas caracterizam-se por alterarem significativamente a paisagem, a ocupação do solo e a qualidade do ar, sendo obras de grande relevo social e espacial.

A construção de vias de comunicação exige um grande consumo de materiais, por serem obras normalmente extensas com uso de diversos materiais. A reciclagem dos materiais utilizados na pavimentação e a conservação de recursos têm sido medidas tendencialmente utilizadas na promoção da sustentabilidade rodoviária (Whatne, 2010).

A utilização das vias pela sociedade contribui, assim como a sua construção, com impactes ambientais significativos, nomeadamente a emissão de gases poluentes, o ruído produzido e o consumo energético realizado pelos veículos. Estes tipos de infraestruturas são particulares ao nível da análise do seu ciclo de vida por serem exigentes na sua manutenção.

O estudo realizado no presente trabalho está ligado indiretamente às questões relacionadas com o esgotamento de recursos naturais, como o petróleo e outros combustíveis (Figura 2), e também com a sustentabilidade ao nível económico e social, tendo em conta os impactes já conhecidos provocados pelo tráfego rodoviário.

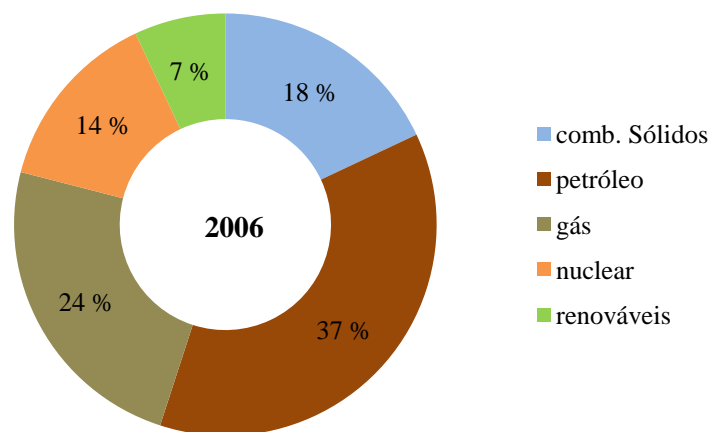


Figura 2 - Distribuição do consumo mundial de energia primária, por fontes de energia no ano de 2006 (adaptado de Occam (2010)).

Assim pode então dizer-se que o uso da estrada implica custos, assim como a sua própria construção. Esses custos estão relacionados com o tráfego rodoviário seja por questões económicas ou por questões da eficiência no uso dos recursos naturais, dado que o consumo

de combustível, assim como as emissões são fatores que são frequentemente convertidos em termos monetários (Bendtsen, 2004).

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).

As medidas tomadas em prol da eficiência do uso de recursos, conseguindo ganhos energéticos e uma abordagem integrada do uso da energia deverá passar pela redução do tráfego rodoviário, apoiada por sistemas de transporte público avançados, sendo as infraestruturas de transporte parte integrante do desenvolvimento local (CIB, 1999).

É ainda imperativo que a decisão de empregar um determinado material deva ser baseada em relações benefício/custo, considerando os custos e prazos de construção e as expectativas traçadas para a vida útil do pavimento, promovendo ainda a utilização de materiais reciclados.

A reciclagem de pavimentos rodoviários foi uma técnica fundamentalmente desenvolvida por aspetos económicos e ambientais. A reciclagem das misturas betuminosas existentes contribui para a redução do impacte ambiental das obras, devido ao facto de não ser necessário colocar as misturas retiradas em vazadouro, reduzindo deste modo o problema da produção de resíduos (Branco *et al.*, 2008).

A técnica da reciclagem deve oferecer soluções que apontem a reabilitação das características estruturais e funcionais e para a minimização da rejeição do material e da utilização dos ligantes, particularmente os betuminosos.

Para as infraestruturas rodoviárias tem vindo a ser estudado o uso de diversos tipos de materiais recicláveis, desde cinzas provenientes da queima de carvão, borracha de pneus usados e de outro tipo de agregados (Edil, 2006), que permitem não só a redução da quantidade de matérias-primas usadas, mas também de resíduos produzidos pelas indústrias. Apesar de não estar relacionada com este trabalho, a reciclagem tem muita relevância no contexto da sustentabilidade na construção rodoviária.

#### **2.1.4 Uso da energia e alternativas**

Melhor eficiência no uso e na produção da energia é um requisito chave para uma política energética mais sustentável. O uso da energia na construção pode ser empregue de forma

direta ou indireta. Embora haja diferenças entre países, o uso da energia na construção corresponde diretamente a 30% da energia total consumida, podendo atingir os 50% se estivermos a contabilizar a energia empregue também de forma indireta (CIB, 1999).

O uso racional da energia tem-se verificado sobretudo em novos edifícios e novas obras, contudo esta é uma política ambiental que não se encontra ao alcance de todos, havendo ainda muitos países que não levam em consideração a melhoria dos desempenhos energéticos em obra, na manutenção e uso das construções.

Para além da promoção da eficiência energética é também fundamental para uma estratégia sustentável o recurso a fonte de energias renováveis como alternativa aos recursos limitados. É comum a classificação deste tipo de energias como “Energias Verdes”.

A energia renovável é aquela cuja utilização não provoca uma redução da quantidade de energia disponível, como é o caso das energias solar, hídrica e eólica. Em oposição, as fontes de energia não renováveis são aquelas que se encontram disponíveis na natureza em quantidades limitadas e cuja intensidade de utilização é superior à capacidade que a natureza tem de as regenerar, levando à sua extinção (Occam, 2010).

A intensificação do consumo tem provocado um aumento do consumo de energia à escala mundial que é cada vez mais insustentável do ponto de vista económico e ambiental. Cerca de 85% da energia consumida mundialmente é proveniente de fontes de energia não renováveis como o carvão, o petróleo e o gás natural (Occam, 2010).

Ao nível do consumo de combustíveis no ramo dos transportes terrestres, novas tecnologias têm sido desenvolvidas e implementadas com o objetivo de evitar o consumo de energias não renováveis e preservar o meio ambiente valorizando a qualidade de vida tanto nas cidades como fora delas.

Em USDE (2012) é dada importância à economia de combustível porque para além de se traduzir em economia financeira, reduz a pegada de carbono e consequentemente reduz as alterações climáticas causadas pela emissão de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), resultante da combustão da gasolina ou gasóleo, que contribui para o “aquecimento global”. A economia de combustível contribui ainda para reduzir a dependência do petróleo que é responsável pela vulnerabilidade dos consumidores manipulação do seu mercado e dos seus preços escandalosos. Na Figura 3 pode-se ver, a título de exemplo, as quantidades de petróleo

importado pelos Estados Unidos da América nos últimos 40 anos em relação à quantidade produzida por esse mesmo país. Para além deste fator é ainda destacado que o petróleo não é um recurso renovável e tendo isso em conta não pode sustentar a taxa de uso atual por um tempo indeterminado, logo deve-se promover o seu uso de forma eficiente enquanto se vão desenvolvendo tecnologias alternativas e outro tipo de combustíveis mais sustentáveis o que se resume em que a economia de combustível aumenta a sustentabilidade energética.

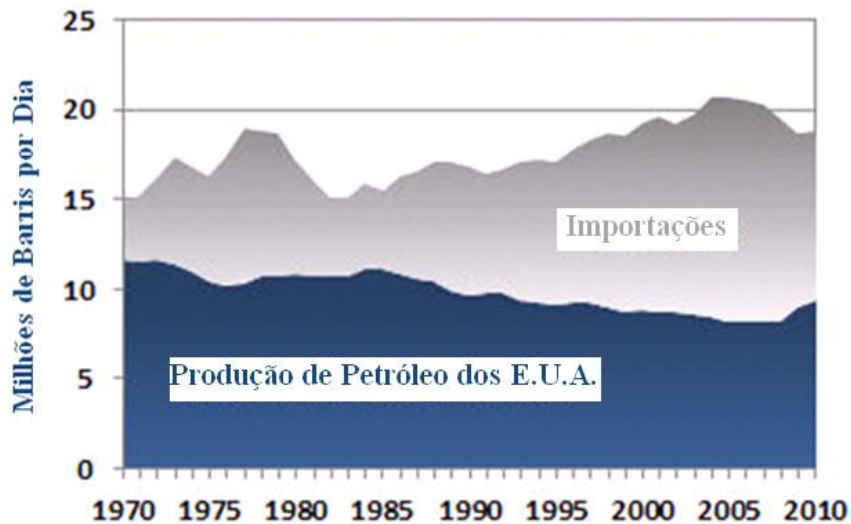


Figura 3 - Quantidade de petróleo importado nos EUA, em comparação com a quantidade que é produzida nesse mesmo país nos últimos 40 anos, em milhões de barris por dia.

Os veículos elétricos e híbridos compõem algumas das tecnologias desenvolvidas recentemente que dispensam parcialmente o uso de combustíveis derivados do petróleo.

Os veículos híbridos combinam a combustão interna do motor de um veículo convencional com uma bateria de alta voltagem e um motor elétrico de um veículo elétrico. O resultado é a capacidade do veículo híbrido alcançar o dobro da economia em combustível de um veículo convencional (USDE, 2012). As suas principais vantagens são, grande eficiência, motores mais leves, emissões de poluentes mais baixa e redução do peso total do veículo o que beneficia o consumo de combustível (USDE, 2012).

Os veículos elétricos usam uma bateria para fornecer energia elétrica ao motor. Este tipo de veículos não utiliza outro tipo de combustível, logo são considerados veículos de emissão zero, pois não produzem emissões de poluentes diretamente. Atualmente os veículos elétricos ainda não conseguem percorrer distâncias grandes sem serem carregados conseguindo atingir tipicamente 100 milhas (160 km) com a bateria totalmente carregada (USDE, 2012).

Nos próximos 30 anos, os motores de combustão interna vão continuar a melhorar e desenvolver com avanços no controlo de emissões e eficiência de combustível. Os híbridos elétricos tornar-se-ão na opção usual para os consumidores quando estes comprarem um veículo. O desenvolvimento e avanço nas componentes elétricas como baterias, motores, geradores, inversores e controlos, foram essenciais para desenvolver os veículos híbridos elétricos. Verifica-se atualmente uma queda nos preços dos veículos híbridos e elétricos, e isso tem estimulado a compra destes veículos por parte dos consumidores, por serem uma mais-valia ao nível da economia de combustível, ao nível ambiental e também pelo próprio desempenho operacional. Logo, estima-se que quando este tipo de veículos estiver completamente introduzido no mercado, os consumidores irão pedir cada vez mais funcionalidade elétrica. Ao nível dos combustíveis, o número de opções irá crescer. Motores limpos e eficientes irão ser desenvolvidos para funcionarem com altas concentrações de biodiesel e etanol, estes componentes surgirão de fontes renováveis e verdes, como as celulósicas. As fontes elétricas serão maioritariamente o vento e a energia solar, enquanto as fontes de hidrogénio para veículos de células de combustível híbridas serão inicialmente de recursos fósseis mas mais tarde de fontes não-fósseis e renováveis através da hidrólise elétrica (Pesaran, 2011).

Em suma, parece haver muitas preocupações em todo o mundo, que visam e promovem a economia de combustível, existindo esforços em várias áreas, nomeadamente na científica, para reduzir a dependência das sociedades de recursos não renováveis, como o petróleo.

### **2.1.5 Eco-Condução**

A eco-condução resume-se a um padrão comportamental de condução que privilegia a economia de combustível e a redução da emissão de poluentes nos veículos automóveis. Este é um parâmetro que pode ser muito influente nos consumos energéticos dos veículos, sendo que a velocidade e aceleração são fatores que contribuem para o consumo de combustível de um veículo, logo a mudança de comportamento por parte do condutor pode favorecer ganhos energéticos.

A eco-condução, além de evitar velocidades elevadas e acelerações fortes, consiste em evitar regimes muito elevados de rotação do motor, antecipando as mudanças na caixa de velocidades, manter uma velocidade constante e manter o veículo em boas condições de manutenção (Barth e Boriboonsomsin, 2009).

A promoção da melhoria de hábitos de condução apresenta-se como uma área de atuação bastante promissora. As boas práticas de condução têm sido a base de projetos desenvolvidos em toda a Europa. Tendo isto em consideração, surge o conceito de eco-condução que destaca entre outros os seguintes ideais (IMTT, 2009):

- A escolha do carro na compra tendo em conta as suas características;
- Conduzir a uma velocidade o mais constante possível e com suavidade;
- Fazer uma boa gestão da caixa de velocidades obtendo baixas rotações;
- A descer, manter o veículo engrenado numa mudança compatível (travar com o motor);
- Escolher o melhor percurso nas deslocações antecipando o fluxo de trânsito;
- Retirar toda a carga desnecessária do veículo;
- Verificar frequentemente a pressão dos pneus.

As práticas que visam as acelerações e travagens suaves, a velocidade de viagem constante e evitar o motor ligado quando o veículo não está em movimento são também defendidas por outros autores (EPA, 2012a).

Iniciativas de eco-condução em empresas de transportes em Portugal revelam reduções de consumos superiores a 2%. Em nações como por exemplo a Finlândia, a eco-condução já é introduzida nos programas de ensino da condução (Occam, 2010).

## **2.2 Resistência ao rolamento**

A resistência ao rolamento nos pavimentos rodoviários é uma área relativamente nova no interesse científico e contempla muitas questões com necessidade de investigação adicional, pois não tem havido respostas claras e consistentes para todas as questões relevantes (Bendtsen, 2004). 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 (Bendtsen, 2004). A velocidade é um parâmetro que influencia a resistência ao rolamento, sendo que esta aumenta se a velocidade também aumentar (Ejsmont, 1990)<sup>1</sup>.

É habitual a realização de ensaios de resistência ao rolamento em pneus, pois este é um parâmetro associado ao seu desempenho, sendo os ensaios realizados pelos fabricantes no

---

<sup>1</sup>Citado em Bendtsen (2004).

âmbito da sua comercialização. O mercado de pneus tem estado já há algum tempo focado em questões ambientais como a economia de combustível, tratamento e reciclagem dos pneus em fim de vida. Apenas recentemente é que esta matéria tem sido estudada especificamente na vertente das características superficiais dos pavimentos rodoviários.

### **2.2.1 Contacto pneu-pavimento**

A interação do pneu de borracha com a superfície dura da estrada resulta na sua deformação sobre carga, gerando assim as forças responsáveis pela tração, o atrito em curva, a aceleração e a travagem (Menzies e Zucchetto, 2006).

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).

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

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 de deslizamento na área de contato entre o pneu e o pavimento.

Na Figura 4 estão apresentados três esquemas elucidativos das deformações que ocorrem no pneu numa situação de contacto com o pavimento.

A perda de energia mecânica associada a cada ciclo de deformação e recuperação é conhecida como histerese (Menzies e Zucchetto, 2006). Este fenómeno é a principal causa pela resistência ao rolamento dos pneus numa superfície rígida (Wong, 2001). 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).

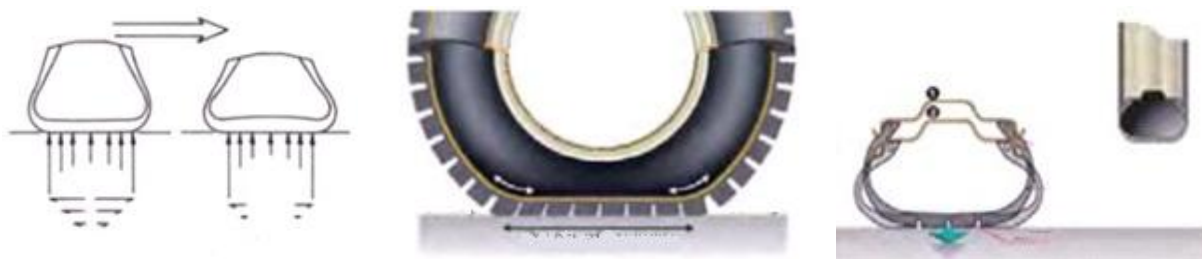


Figura 4 - Representação esquemática das deformações impostas aos pneus de um veículo, assim como a deflexão das paredes laterais (adaptado de (Gent e Walter, 2006)).

Outros estudos comprovam a existência de deformação do pavimento no contato com o pneu, esta deformação depende da rigidez que o pavimento apresenta. Uma roda de um veículo em andamento produz um efeito de onda na superfície do pavimento à frente e atrás da roda e também compressão debaixo da roda. Este efeito vai resultar em consumo de alguma energia e por isso é certo que contribui para a resistência ao rolamento (Sandberg, 1997)<sup>2</sup>.

No entanto nem só os pneus estão na origem da resistência ao rolamento, as características superficiais do pavimento tem também um papel importante neste parâmetro, como por exemplo a macrotextura. A profundidade média da textura vai influenciar a resistência ao rolamento. A Figura 5 apresenta um exemplo da correlação entre o coeficiente de resistência ao rolamento<sup>3</sup> e a profundidade média característica da textura num pavimento, que surgiu de um estudo bastante representativo da generalidade dos estudos que se efetuam neste campo. Pode verificar-se que a resistência ao rolamento aumenta com o crescimento da profundidade média.

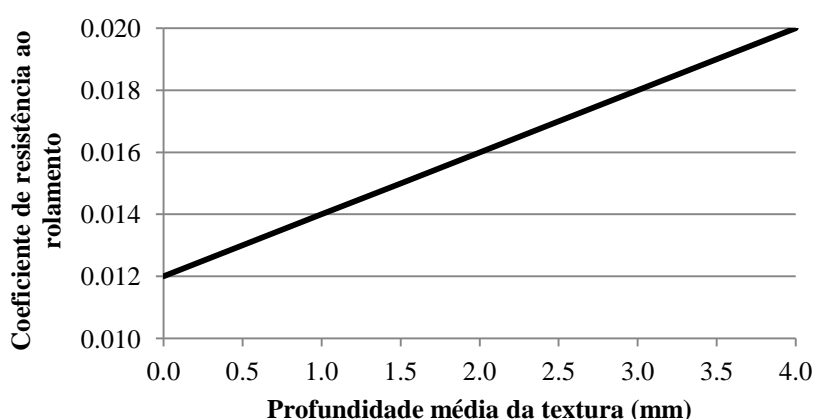


Figura 5 - Correlação da resistência ao rolamento, com a profundidade média da textura de um pavimento (adaptado de Descornet (1990)).

<sup>2</sup> Citado em Bendtsen (2004).

<sup>3</sup> Perda de energia por unidade de distância a dividir pela carga aplicada.



### 2.2.2 Avaliação da resistência ao rolamento

A resistência ao rolamento de diferentes tipos de pneus pode ser medida em laboratório usando diferentes equipamentos de ensaios, como o equipamento de “tambor” ou de “correias planas” (Figura 6). No que diz respeito ao conjunto pneu/pavimento, a resistência ao rolamento pode também ser medida mais recentemente nas estradas usando um veículo ou um reboque específico para o fim. Um método indireto é medir o consumo de energia numa determinada distância em diferentes pavimentos com os mesmos pneus (Bendtsen, 2004). A realização do presente trabalho é muito próximo do contexto do método indireto referido.

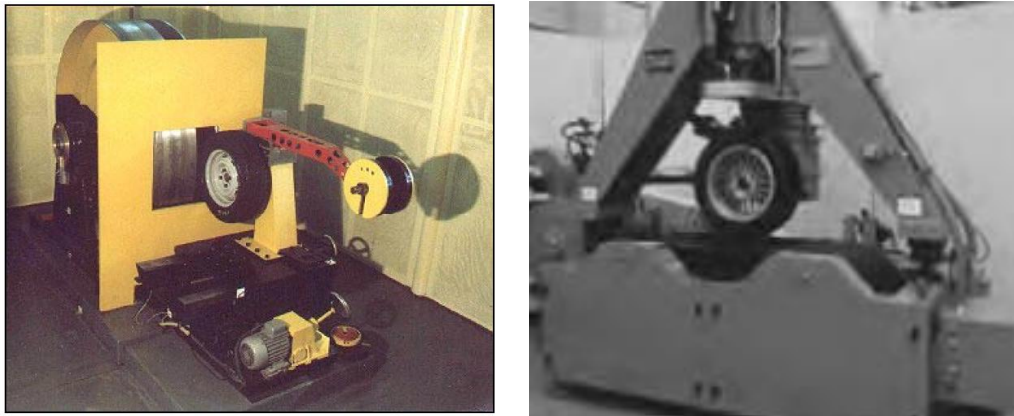


Figura 6 - Equipamentos denominados de “tambor” e de “correias planas”, para medir a resistência ao rolamento no contacto pneu/pavimento (adaptado de Sandberg e Ejsmont (2000) e Gent e Walter (2006)).

O método do “tambor” é um método laboratorial padrão da ISO e descreve-se em grosso modo por um pneu que desliza num tambor com uma superfície lisa (Bendtsen, 2004), estando o pneu submetido à força gravítica e sendo o coeficiente de resistência ao rolamento medido pelo método de torque (Sandberg e Ejsmont, 2000), e é determinado pela perda de energia por unidade de distância dividido pela carga aplicada. Este método normalizado pela ISO inclui ajustamentos para a temperatura (Hammarstrom *et al.*, 2009), sendo um ensaio laboratorial de condições controladas. Todavia este método não relaciona a resistência ao rolamento medida com o consumo de combustível de um veículo.

As medições denominadas por *coastdown* são também utilizadas para avaliar a influência de diferentes pavimentos no consumo de combustível. Este método consiste em acelerar um veículo até uma determinada velocidade e a partir de um certo ponto deixá-lo deslizar em “ponto morto”, neste instante o veículo entra em desaceleração, perdendo velocidade através das forças impostas ao veículo, entre as quais a resistência ao rolamento. Este método ocorre

em estradas reais onde outros fatores podem condicionar a desaceleração referida. Num estudo utilizando este método, Hammarstrom *et al.* (2009) enunciam um conceito de “resistência ao movimento do veículo”, que se apresenta de seguida, e advertem para a eventual confusão que se pode fazer com o conceito de “resistência ao rolamento”.

### **2.2.3 Resistência ao movimento do veículo**

As questões de interesse na dinâmica do veículo são principalmente as resistências associadas ao seu movimento e toda a energia necessária para ultrapassar essas resistências. Este tema será abordado com mais rigor no Subcapítulo 2.4.

As resistências ao movimento do veículo podem ser divididas em duas categorias, as resistências estacionárias, e as resistências dinâmicas. As primeiras ocorrem quando o veículo se move a uma velocidade constante, como a resistência ao rolamento ou a resistência aerodinâmica, enquanto as outras ocorrem quando o veículo está em aceleração e este tipo de resistência é causada pela inércia do veículo, no entanto as resistências estacionárias continuam a atuar mesmo na fase de aceleração (Heißing e Ersoy, 2011).

Os consumos de combustíveis registados resultam de um conjunto de resistências na qual se insere a resistência ao rolamento, a “resistência ao movimento do veículo” resulta de um conjunto total de resistências que intervêm para reduzir a velocidade, sendo estas as seguintes (Hammarstrom *et al.*, 2009):

- Resistência ao ar;
- Resistência ao rolamento;
- Resistência inercial;
- Resistência ao gradiente;
- Resistência à força lateral;
- Perdas na transmissão;
- Perdas no uso de auxiliares;
- Atrito no motor.

## **2.3 Influência da infraestrutura rodoviária na resistência ao rolamento**

Hammarstrom *et al.* (2009) enunciam três propriedades essenciais da superfície de um pavimento rodoviário seco, que contribuem para a resistência ao rolamento, sendo elas:

- Irregularidade;

- Macrotextura;
- Declive da superfície.

Em superfícies molhadas observa-se com frequência uma maior resistência ao rolamento do que em superfícies secas (Wong, 2001).

Para um entendimento mais concreto à cerca a influência da infraestrutura rodoviária na resistência ao rolamento, é importante abordar a tecnologia que envolve a sua constituição, sendo os materiais maioritariamente utilizados nesta tecnologia, as misturas betuminosas.

### 2.3.1 Generalidades das misturas betuminosas

As vias de comunicação são infraestruturas essenciais para o desenvolvimento socioeconómico de uma sociedade e ainda para a qualidade de vida humana num mundo complexo e em constante modernização onde as deslocações de pessoas e de mercadorias fazem parte do quotidiano. Recentemente tem-se verificado um aumento na existência de estradas assim como um aumento dos volumes de tráfego, originado uma promoção ao conforto de circulação e ao desempenho mais eficiente dos pavimentos rodoviários.

Um pavimento rodoviário é considerado como um sistema multi-estratificado (Figura 7), formado por várias camadas de espessura finita, apoiadas na fundação constituída pelo terreno natural (maciço semi-indefinido, o qual pode ter um coroamento de qualidade melhorada (Branco *et al.*, 2008).

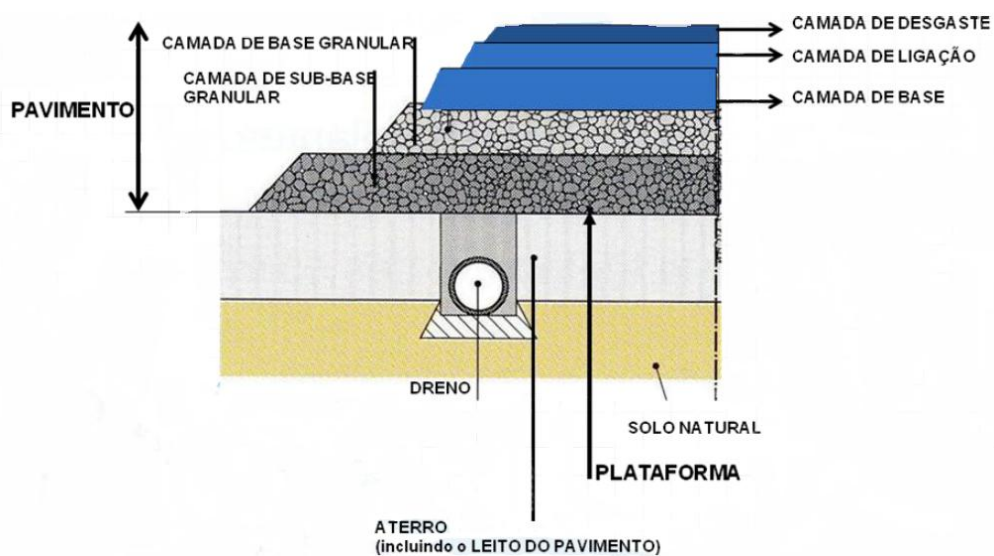


Figura 7 - Representação esquemática do sistema multi-estratificado que constitui um pavimento rodoviário (InIR, 2009).

As camadas constituintes do pavimento rodoviário podem ser "camadas ligadas", constituídas por materiais granulares (britas e areias) estabilizados com ligantes, ou camadas simplesmente granulares constituídas por materiais inertes, britados ou naturais (Branco *et al.*, 2008).

A camada superficial é usualmente denominada por "camada de desgaste", esta destaca-se de todas as outras por ser a camada responsável por assegurar as características funcionais relacionadas com o conforto e a segurança de circulação, tendo ainda uma contribuição estrutural pois representa a barreira de impermeabilização para proteger as camadas que lhe sucedem da entrada de água. Esta parte constituinte do pavimento, será mais focada no estudo presente neste trabalho, sendo as suas características alvo de maior atenção.

De acordo com os dois critérios de classificação dos pavimentos rodoviários, o tipo de materiais e a deformabilidade, podem distinguir-se os seguintes tipos de pavimentos: flexíveis, rígidos e semirrígidos (Branco *et al.*, 2008).

Os pavimentos flexíveis apresentam as camadas superiores formadas por misturas betuminosas (InIR, 2009), ou seja, por materiais estabilizados com ligantes hidrocarbonados, geralmente o betume asfáltico (Branco *et al.*, 2008). A constituição de um pavimento flexível pode ser muito diversa, em função da intensidade do tráfego, da resistência do solo de fundação e das características dos materiais disponíveis, as quais, por sua vez dependem das condições climáticas.

Os pavimentos rígidos têm uma camada superior constituída por betão de cimento, ou seja por material granular estabilizado com ligantes hidráulicos, seguida de uma ou duas camadas inferiores constituídas também por material granular estabilizado com ligante hidráulico ou apenas constituídas por material granular (Branco *et al.*, 2008).

Os pavimentos semirrígidos apresentam características comuns aos dois tipos de pavimentos anteriores, possuem as camadas superiores em mistura betuminosa, sendo as camadas subjacentes às betuminosas e sobrejacentes ao leito do pavimento em materiais granulares tratados com ligantes hidráulicos, com uma importante influência na capacidade de carga do pavimento (InIR, 2009).

Os materiais que constituem as camadas de pavimento são geralmente materiais provenientes de rocha sã, podendo nalgumas circunstâncias serem constituídas por solos selecionados, sendo habitual designá-las por "agregado britado de granulometria extensa", isto para as

camadas não tratadas, já para as camadas aglutinadas com ligantes hidráulicos podem-se misturar o betão de cimento para camadas de desgaste de pavimentos rígidos e o betão pobre para camada de sub-base. As camadas formadas por misturas betuminosas são constituídas por agregado aglutinado com betume asfáltico (Branco *et al.*, 2008).

Para formular uma mistura betuminosa é necessário definir as quantidades de material granular entre duas curvas limite especificadas, designadas por fuso. Com a curva granulométrica de material escolhida, pode-se optar pelo método de Marshall que é dos mais utilizados, que corresponde à norma portuguesa (NP-142), para determinar o teor em betume ao nível laboratorial em função de várias grandezas que caracterizam a mistura betuminosa, sendo elas a estabilidade, a deformação, a densidade ou baridade aparente, a porosidade e o volume de vazios (VMA). A percentagem ótima de betume será a média das percentagens correspondentes ao maior valor das grandezas referidas.

A grande maioria das misturas betuminosas em Portugal é produzida a quente. A sua colocação em obra compreende as seguintes operações (Branco *et al.*, 2008):

- preparação da superfície que recebe a mistura;
- transporte da mistura para o local de execução;
- espalhamento da mistura;
- compactação da mistura.

### **2.3.2 Influência da textura**

As características superficiais de um pavimento rodoviário são essenciais para o seu desempenho funcional, sendo a textura um parâmetro importante para avaliar a resistência ao rolamento e a aderência. A textura de um pavimento possui três componentes: a microtextura, a macrotextura e a megatextura (Figura 8).

A microtextura está relacionada com asperezas de pequena escala na superfície dum pavimento rodoviário que podem ter dimensões ao nível da fração de milímetros representando a aspereza da textura superficial (Menziés e Zucchetto, 2006). 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 (Schmidt e Ullidtz, 2010).

A macrotextura de uma camada de desgaste corresponde ao domínio de comprimento de onda entre 0,5 mm e 50 mm, com uma amplitude vertical compreendida entre 0,1 mm e 20 mm. Esta escala de textura pode ser medida por um método volumétrico da mancha ou por um método perfilométrico sem contato (Branco *et al.*, 2008). A macrotextura contribui ainda para o atrito na sua componente de histerese e assegura o escoamento da água presente no pavimento para o exterior, reduzindo a possibilidade de aquaplanagem ao restabelecer os componentes de aderência na fricção ao nível da microtextura (Schmidt e Ullidtz, 2010).

Na Figura 8 apresenta-se exemplos simplificados de vários tipos de texturas, e na Figura 9 pode-se ver as diferentes gamas de análise da textura segundo as suas dimensões.

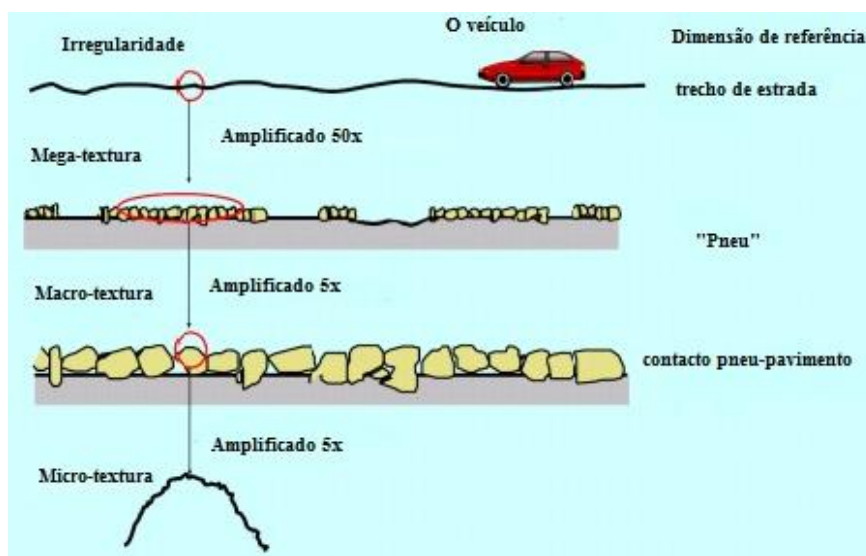


Figura 8 - Exemplos simplificados de diferentes tipos de texturas num pavimento rodoviário (adaptado de Sandberg (2002)).

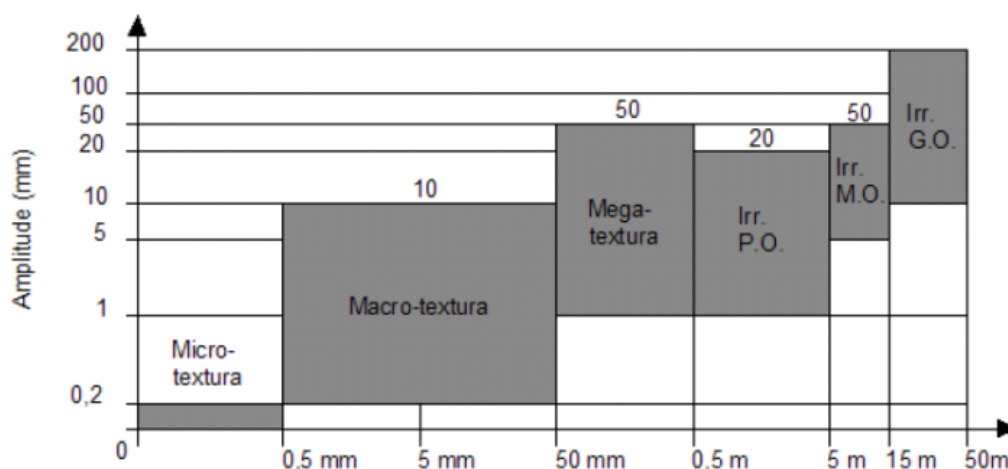


Figura 9 - Diferentes gamas de análise da textura de um pavimento rodoviário frequentemente utilizadas (AIPCR/PIARC, 2003).

A megatextura da camada de desgaste de um pavimento corresponde ao domínio de comprimento de onda compreendido entre 50 mm e 500 mm, com uma amplitude vertical compreendida entre 0,1 mm e 50 mm.

Esta característica, que geralmente não é avaliada relaciona-se com os comprimentos de onda da mesma ordem de grandeza dos que intervêm no contacto pneu-pavimento (Branco *et al.*, 2008). Outras deformações e degradações existentes no pavimento podem ocorrer ao nível da megatextura, tais como, ninhos e deformações localizadas (Menezes, 2008). 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 ainda no conforto de circulação.

A macrotextura é normalmente medida através do método volumétrico da mancha, este método tem vindo a ser usado desde há muitos anos para medir a textura de pavimento e consiste em espalhar sobre a superfície um determinado volume de esferas de vidro monogranulares que é rasado e espalhado numa mancha circular, até preencher as depressões da superfície, e ficar nivelada com as saliências. O diâmetro médio da mancha permite o cálculo da profundidade média da textura superficial, que resulta da divisão do volume de esferas de vidro pela área da superfície do círculo. Na Figura 10 é apresentado um esquema do método volumétrico da mancha.

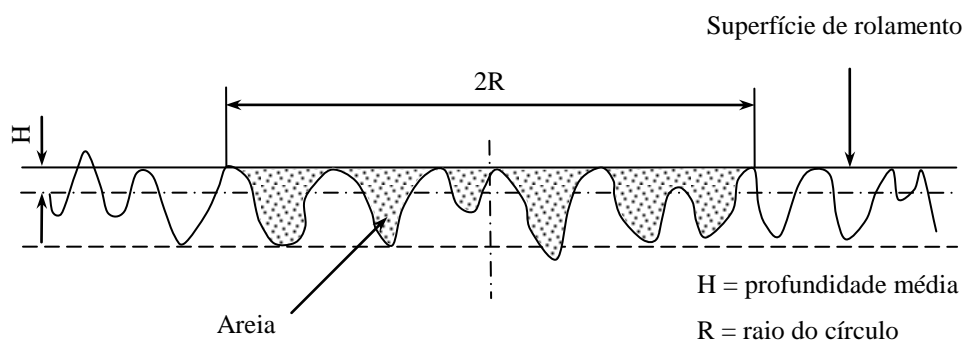


Figura 10 - Esquema para determinação da altura média pelo método volumétrico da mancha.

Para além do método volumétrico da mancha, existem outros métodos utilizados mais recentemente. Um deles é a utilização de equipamentos laser que permitem determinar com precisão o perfil da superfície, a partir do qual se determinam parâmetros como a profundidade média do perfil ou o IRI. Este método tem a grande vantagem de poder registar valores da textura ou do IRI em contínuo (Branco *et al.*, 2008), enquanto que o método volumétrico da mancha se caracteriza por ser um ensaio pontual.

No trabalho de Hammarstrom *et al.* (2009) foi elaborado um estudo que relaciona a resistência ao rolamento com a macrotextura, medida através da profundidade média, e ainda com a irregularidade, classificada pelo IRI. Os valores registados confirmaram um aumento da resistência ao rolamento com o aumento da profundidade média da textura e também com o aumento da irregularidade para as mesmas condições de ensaio.

O método representado na Figura 11 permite estimar a profundidade média do perfil e comparar os resultados com os obtidos pelo ensaio volumétrico da mancha. A irregularidade do pavimento é classificada através do parâmetro *International Roughness Index* (IRI), recorrendo à utilização de perfilómetros equipados com laser para o levantamento do perfil longitudinal, baseado no modelo de "quarto de veículo".

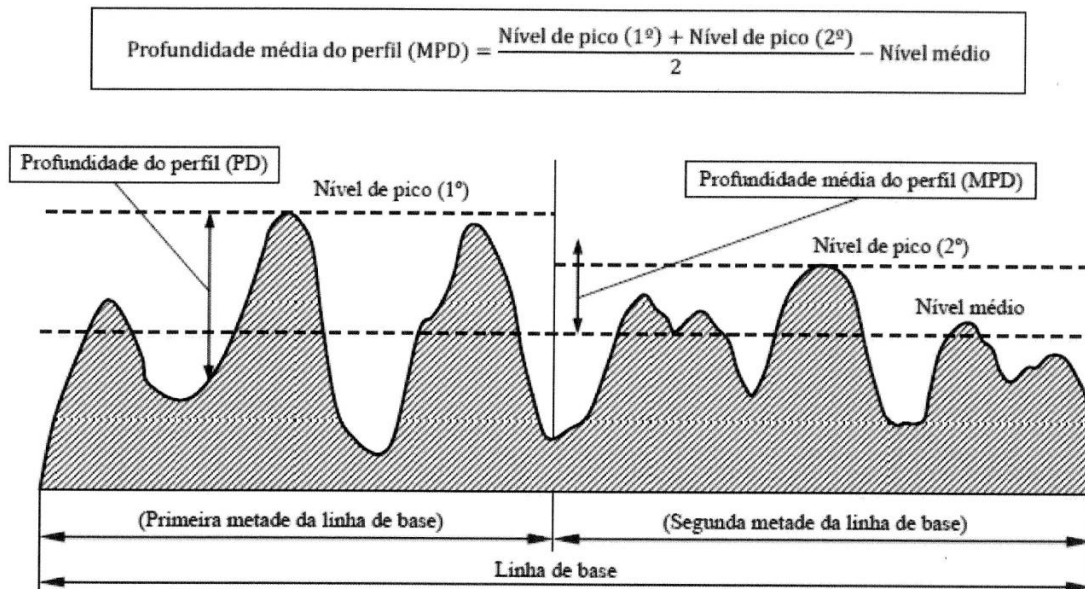


Figura 11 - Esquema representativo da profundidade média estimada da textura (Schmidt e Ullidtz, 2010).

A textura de um pavimento é importante também para avaliar por exemplo, resistência à derrapagem, ou ainda a emissão de ruído que resulta do contacto do pneu com o pavimento. É sabido que a resistência ao rolamento contribui significativamente para o consumo de combustível como se apresentou no Subcapítulo 2.2. De acordo com Bendtsen (2004), os consumos de combustível num pavimento muito rugoso podem ser 11% mais elevados do que num pavimento extremamente macio. Na Figura 12 pode-se verificar a relação da resistência ao rolamento com o aumento da rugosidade, num estudo realizado por DeRaad (1977)<sup>4</sup>.

<sup>4</sup> Citado em Wong (2001).



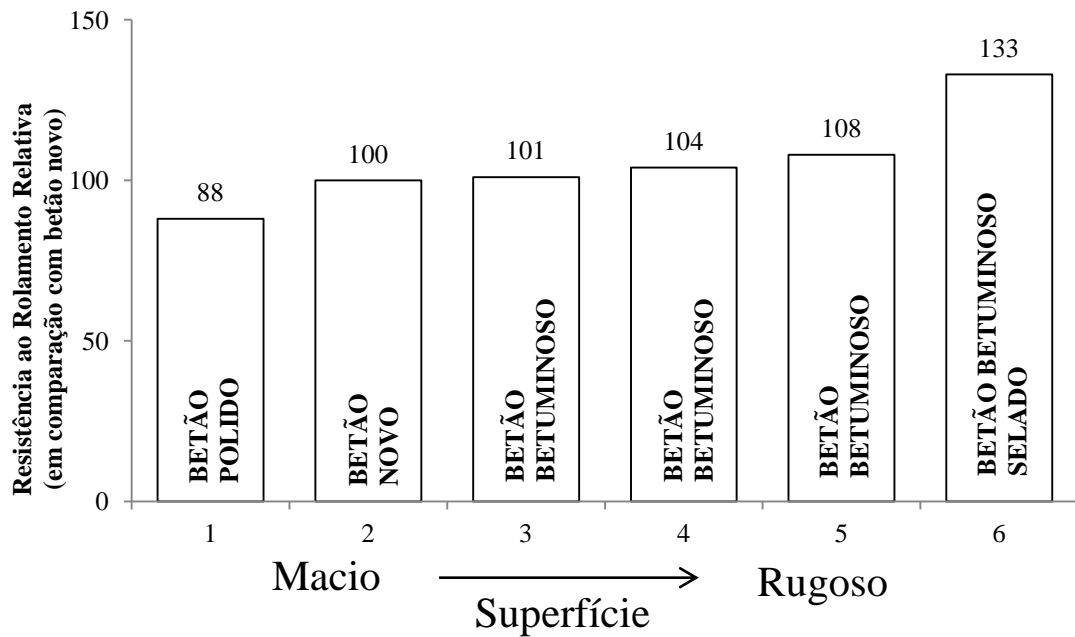


Figura 12 - Variação da resistência ao rolamento do pneu com a textura superficial do pavimento (adaptado de DeRaad (1977)).

Com o tempo vai-se dar um desgaste do pavimento imposto pelos veículos modificando assim o valor inicial da sua textura. Estas alterações ocorrem principalmente na zona de passagem das rodas. Pode suceder que a perda de textura signifique o desaparecimento dos efeitos favoráveis da superfície do pavimento (Río, 1999), o que se pode traduzir em alterações da contribuição da textura nos consumos de combustível em função do desgaste da estrada causado, entre outros, pelo tráfego.

Em geral exige-se aos pavimentos, o respeito pela geometria definida no projeto, ou seja a ausência de deformações permanentes em perfil transversal (rodeiras) ou em perfil longitudinal (traduzidas em Portugal, por um índice de irregularidade longitudinal - IRI), ou ainda defeitos localizados de superfície, como covas, depressões, saliências, fendas e materiais soltos (Branco *et al.*, 2008). Esta exigência deve-se, para além de outros resultados funcionais como o conforto para o utente, a evitar o desgaste mecânico do veículo e à redução dos consumos de combustível e emissão de poluentes.

Tanto a irregularidade como a macrotextura têm influência no consumo de combustível, mas as alterações na irregularidade tem muito maior influência no consumo de combustível do que a macroestrutura (Bendtsen, 2004). A diferença no IRI entre uma estrada nova e bem regularizada e uma estrada desgastada e muito irregular, pode gerar diferenças no consumo de combustível entre 2 a 16% (Schmidt e Ullidtz, 2010).

### **2.3.3 Influência da rigidez**

A rigidez da camada superficial do pavimento depende do tipo da mistura betuminosa e da relação usada nos agregados mas também de condições ambientais como a temperatura (Menziés e Zucchetto, 2006).

A rigidez da superfície de uma via rodoviária e o seu amolecimento pode ser significativa na resistência ao rolamento e conseqüentemente também no consumo de combustível (Bendtsen, 2004). De acordo com Wong (2001), numa superfície rígida e macia a resistência ao rolamento é consideravelmente mais baixa do que numa superfície rugosa.

O módulo de rigidez de uma mistura betuminosa difere em função da temperatura, isto deve-se às propriedades viscoelásticas deste material. O efeito de histerese referido anteriormente surge segundo essas propriedades, transformando a energia mecânica, resultante dos movimentos repetitivos de flexão, em calor. A quantidade de energia perdida na deformação do pavimento dependerá também da rigidez da sua estrutura (Menziés e Zucchetto, 2006).

Quanto maior a perda de calor pelo efeito de histerese, maior será a energia mecânica a ter que ser fornecida pelo motor do veículo para compensar essa perda, procedendo a um maior consumo de energia (Menziés e Zucchetto, 2006). Este fenómeno pode ocorrer tanto no pneu como no pavimento, tendo em conta que o ligante empregue nas camadas betuminosas apresenta um comportamento viscoelástico.

Contudo a perda da energia no rolamento não estará apenas relacionada com este fenómeno, como já se viu anteriormente, pois a irregularidade e a megatextura de um pavimento rodoviário causam vibrações no sistema de suspensão que resulta também em perdas de energia no sistema (Bendtsen, 2004).

De acordo com alguns autores consideram que a deformação do pavimento sob a carga aplicada por uma roda só ocorre nos pavimentos flexíveis, apresentando os pavimentos rígidos uma rigidez tal que não se considera a ocorrência de deformação no pavimento, tendo apenas deformação no pneu (Bendtsen, 2004). A via rodoviária contribui assim para a resistência ao rolamento por se deformar e fletir sob a carga de uma roda (Menziés e Zucchetto, 2006).

Do ponto de vista ambiental, Whatne (2010) refere que a rigidez de um pavimento em betão (rígido) significa menor consumo de combustível no veículo e menos emissões de poluentes.

## **2.4 Fatores que influenciam os consumos de combustível**

Em relação à energia do veículo, pode-se dizer que existem várias forças a atuar no seu movimento. Todas estas forças obrigam o motor do veículo a consumir mais energia.

A maioria dos fatores que influenciam os consumos dos veículos está relacionada com os aspetos técnicos do próprio veículo, nomeadamente as características dos pneus, para além dos fatores relacionados com a superfície do pavimento.

Segundo Bendtsen (2004), a resistência aerodinâmica, a inércia do veículo, o atrito existente no motor e no sistema de transmissão e ainda a força causada pela resistência ao rolamento colaboram para o aumento de energia gasta pelo veículo, tendo todas elas uma importância decisiva em diferentes cenários de condução. 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. É ainda defendido nesse trabalho que a velocidade e direção do vento são importantes na resistência ao movimento do veículo.

### **2.4.1 Contribuição da aerodinâmica**

A importância da aerodinâmica torna-se maior em velocidades elevadas, a sua 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). A aerodinâmica dos pneus apresenta também um papel importante nas resistências inerentes ao movimento do veículo, podendo representar até 15% da resistência ao rolamento do pneu em movimento (Schmidt e Ullidtz, 2010). Em cenários de condução onde se praticam velocidades elevadas a aerodinâmica do pneu tem uma influência significativa.

A resistência aerodinâmica causa maior consumo de energia em vias rápidas pois estas forças de resistência são proporcionais à velocidade do veículo (Menzies e Zucchetto, 2006).

### **2.4.2 Contribuição dos pneus**

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

O conhecimento na indústria dos pneus permite calcular os seus efeitos nos consumos de combustível. Modelos empíricos e ensaios laboratoriais têm sido utilizados, permitindo o desenvolvimento de alterações na resistência ao rolamento contribuindo uma melhor eficiência energética nos consumos, sendo esta uma preocupação dos fabricantes nas últimas décadas.

Sendo o contacto pneu-pavimento responsável pela resistência ao rolamento, é evidente que esta vai ser influenciada pelo tipo de pneu, pelo desenho do piso e o material com que é produzido. Consequentemente estes parâmetros vão também afetar o consumo de combustível. O desenho do piso ou desenho da escultura do pneu, 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). A carga aplicada, a pressão do ar e a temperatura são os fatores mais importantes para a resistência ao rolamento (Menzies e Zucchetto, 2006).

No entanto outros fatores são considerados na resistência ao rolamento, apesar da sua importância mais secundária como, a resistência devido ao ar que circula dentro do pneu, e o efeito do ar que cerca o pneu em rotação no movimento do veículo (Wong, 2001).

A deformação repetitiva do pneu e a sua recuperação provoca que a energia mecânica seja convertida em calor, originando assim resistência ao rolamento, devido ao fenómeno de histerese (Menzies e Zucchetto, 2006) já referido anteriormente. O efeito de histerese no material constituinte do pneu pode representar entre 80 a 90% da resistência ao rolamento (Schmidt e Ullidtz, 2010), 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 afeta a resistência ao rolamento. Altas velocidades conjugadas com uma condução característica de vias extraurbanas podem resultar em aumentos da resistência ao rolamento com o aumento da frequência de deformação no pneu (Menzies e Zucchetto, 2006).

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. De facto, a relação entre a resistência ao rolamento e a deflexão das paredes laterais devido à carga aplicada é aproximadamente linear (Menzies e Zucchetto, 2006), por isso a resistência ao rolamento é aproximadamente proporcional à carga aplicada.

Um aumento da pressão e da temperatura do pneu contribuem para uma redução na resistência ao rolamento (Ejsmont, 1990). As alterações na pressão afetam também a deformação do pneu. A deformação 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, 2001). Para além de um adequado valor de pressão no pneu, o seu alinhamento também é importante para melhorar a eficácia do consumo energético no veículo (Menzies e Zucchetto, 2006). Os pneus com pressão reduzida apresentam mais deflexão nas paredes laterais, no entanto a relação da pressão de ar com a resistência ao rolamento não é linear (Menzies e Zucchetto, 2006).

Segundo Menzies e Zucchetto (2006), já se sabe há algum tempo que as superfícies rodoviárias rugosas contribuem para as perdas de energia no rolamento por agravarem a deformação nos pneus. Este efeito pode aumentar a perda de energia entre 5 a 20%.

#### **2.4.3 Contribuição da velocidade e do comportamento do condutor em cenários de condução urbana e em via rápida**

Num cenário de condução urbana onde predominam as paragens e acelerações, a inércia do veículo, dependendo da aceleração e da massa, prevalece sobre as outras forças nos consumos. Para baixas velocidades, ou velocidades estáveis, a resistência ao rolamento é o fator de maior importância, enquanto para velocidades elevadas a resistência aerodinâmica torna-se muito influente no consumo de combustível (Bendtsen, 2004), deixando as outras forças para segundo plano. Em Hammarstrom *et al.* (2009) ainda é referido que o tráfego circundante pode afetar a aerodinâmica de um veículo.

A Figura 13 e a Figura 14 apresentam um esquema que representa as perdas de energia para diferentes cenários de condução. Representa-se um cenário de condução em meio urbano (Figura 13), e outro de condução em via rápida (Figura 14).

Pode verificar-se uma inversão de preponderância em relação à perda de energia nos fatores da aerodinâmica e da resistência ao rolamento do veículo, sendo a aerodinâmica mais preponderante na condução em via rápida, e a resistência ao rolamento mais preponderante em vias urbanas com tráfego intenso. Na condução urbana, só 10 a 15% da energia é em última análise transmitida para as rodas, já em vias rápidas, as perdas devidas ao tempo de espera são mais baixas e o motor funciona de forma mais eficiente resultando numa análise em que é transmitida cerca de 20% da energia para as rodas (Menzies e Zucchetto, 2006).



Figura 13 - Exemplo da perda de energia para um modelo de veículo de passageiros médio em condução urbana (adaptado de USDE (2012)).



Figura 14 - Exemplo da perda de energia para um modelo de veículo de passageiros médio em via-rápida (adaptado de USDE (2012)).

Foi possível também ver nestes exemplos que o consumo de energia é distribuído por vários sectores inerentes ao funcionamento do veículo, tendo cada um a sua contribuição na totalidade dos consumos. São indicadas perdas na transmissão, nos acessórios e no motor.

Tendo visto que as perdas de energia diferem segundo um determinado comportamento de condução, seja ele urbano ou em via rápida, um fator determinante na resistência ao rolamento é a velocidade de circulação.

De acordo com Menzies e Zucchetto (2006), numa condução em meio urbano, com períodos de paragem e arranque, e velocidades reduzidas, verificou-se que veículos com pneus com menos 10% de resistência ao rolamento tinham consumos reduzidos entre 1,2 e 1,5%. Já num cenário de condução a velocidades altas e estabilizadas em meio extraurbano, com os mesmos veículos, o consumo reduz-se em 0,9 até 2,1%. Este comportamento sugere a existência de uma relação entre a resistência ao rolamento e diferentes gamas de velocidade.

A resistência ao rolamento é também afetada pela velocidade na condução devido ao aumento de trabalho na deformação do pneu e das vibrações na estrutura com o seu aumento (Wong, 2001). Na Figura 15 representa-se esquematicamente as ondas permanentes (*standing waves*) que se formam na sua estrutura quando em rolamento, responsáveis pela vibração dos pneus.

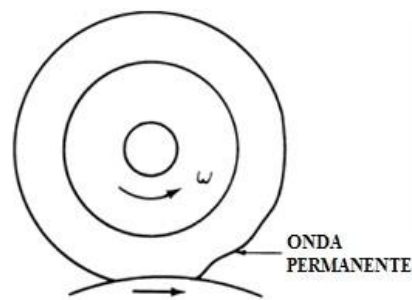


Figura 15 - Representação esquemática da formação de ondas permanentes nos pneus (adaptado de Wong (2001)).

Estas ondas formam-se porque, a velocidades elevadas, a camada superficial do pneu não recupera imediatamente da sua distorção originada pela sua deflexão depois de desencostar da superfície do pavimento, cuja deformação residual cria uma onda. A amplitude dessa onda está no seu máximo imediatamente após deixar o contacto com a superfície e é amortecida exponencialmente sobre a circunferência do pneu. A formação deste tipo de ondas aumenta muito a perda de energia convertendo-a em calor (Wong, 2001).

#### 2.4.4 Ações sobre os materiais

Ao reduzir as cargas aplicadas às rodas, a eficiência do motor e da transmissão vai aumentar, contribuindo para uma economia energética do veículo (Menzies e Zucchetto, 2006). Quanto

maior a carga maior será a resistência ao rolamento, tendo veículos mais pesados um consumo de combustível superior a veículos mais leves.

A temperatura é um fator climático a ter em conta no que diz respeito à resistência ao rolamento e consumo energético, tanto para o pavimento da estrada, como para os pneus. A temperatura no pneu pode depender de várias questões tais como, o desenho do piso do pneu, os materiais constituintes, o tempo de rolamento com uma superfície e a velocidade de rolamento.

A temperatura no pneu tem influência na resistência ao rolamento de duas formas diferentes: uma consiste na alteração de temperatura do ar que está presente na cavidade do pneu, e assim alterando a pressão; e a outra consiste na alteração da rigidez e do efeito de histerese dos componentes da borracha (Wong, 2001).

Para altas temperaturas no ambiente, os estudos apontam para uma redução na resistência ao rolamento. Segundo Menzies e Zucchetto (2006) isto deve-se à quantidade de energia dissipada quando a borracha está sujeita a deformação repetitiva. O período de tempo que um pneu rola desde a última vez que arrefeceu afeta a resistência ao rolamento que se reduz nos primeiros 30 minutos que o pneu se encontra em rolamento, estabilizando a partir dessa altura devido ao facto de a temperatura também estabilizar.

## **2.5 Relação entre a resistência ao rolamento e o consumo energético**

Tem sido demonstrada a existência de uma influência direta entre a resistência ao rolamento e o consumo de combustível do veículo.

Reduzir a resistência ao rolamento e assim a energia mecânica necessária numa determinada quantidade traduzir-se-á numa redução grande no consumo total de combustível porque a necessidade de enviar combustível para o motor será menor (Menzies e Zucchetto, 2006).

No trabalho de Sandberg (2002) atribui-se a designação de "fator de retorno" à redução gerada no consumo de combustível quando se altera a resistência ao rolamento em 10%. O autor defende que este fator de retorno pode variar entre 2 a 3% na redução do consumo de combustível. Já segundo Menzies e Zucchetto (2006) essa mesma variação na resistência ao rolamento será traduzida em 1 ou 2% na economia do combustível.



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.

No âmbito da realização de um tipo de aprovação sistemática de novos veículos em relação à poluição emitida, foi definido pela União Europeia através do programa “*Leonardo da Vinci*” um ciclo de condução especial que é representativo da condução em meio urbano e também em vias rápidas a altas velocidades. Em princípio este mesmo sistema poderá ser usado para estimar a influência média da resistência ao rolamento para pavimentos diferentes ou para pneus diferentes. Tendo em conta dez tipos de comportamento diferentes de condução deduziu-se que a resistência ao rolamento representa 14% de influência dentro de todos os fatores que afetam o consumo de energia. Deste modo, Bendtsen (2004) obteve as alterações na relação da resistência ao rolamento com o consumo de energia apresentadas na Figura 16.

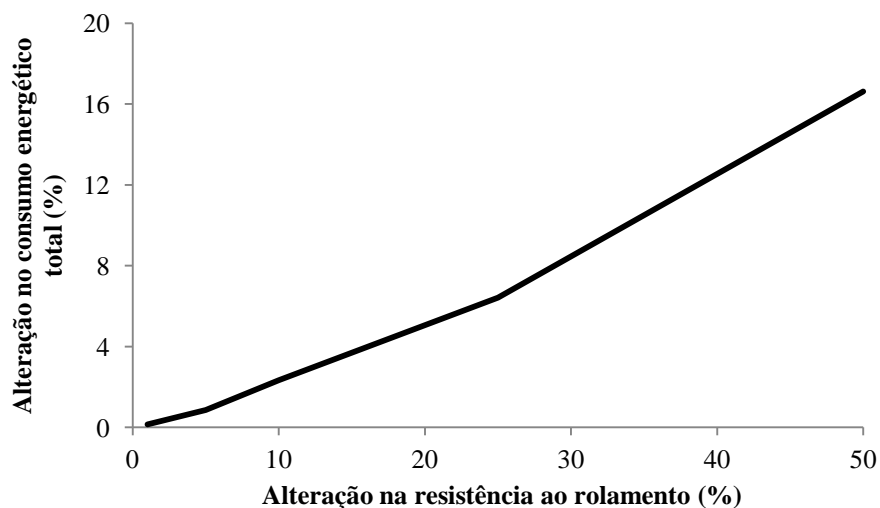


Figura 16 - Efeito na energia consumida em percentagem, em função das alterações na resistência ao rolamento (adaptado de Bendtsen (2004)).

Pode-se verificar na Figura 16 que não existe linearidade na relação das alterações da variação do consumo de combustível com a resistência ao rolamento. No entanto, neste estudo de testes de emissões de poluentes da União Europeia foi possível verificar através ciclo de condução criado, um crescimento linear do consumo de combustível com o aumento do coeficiente de resistência ao rolamento dos vários pneus utilizados.

Por último, na Figura 17 pode-se verificar o comportamento da relação do consumo de combustível com o coeficiente de resistência ao rolamento.

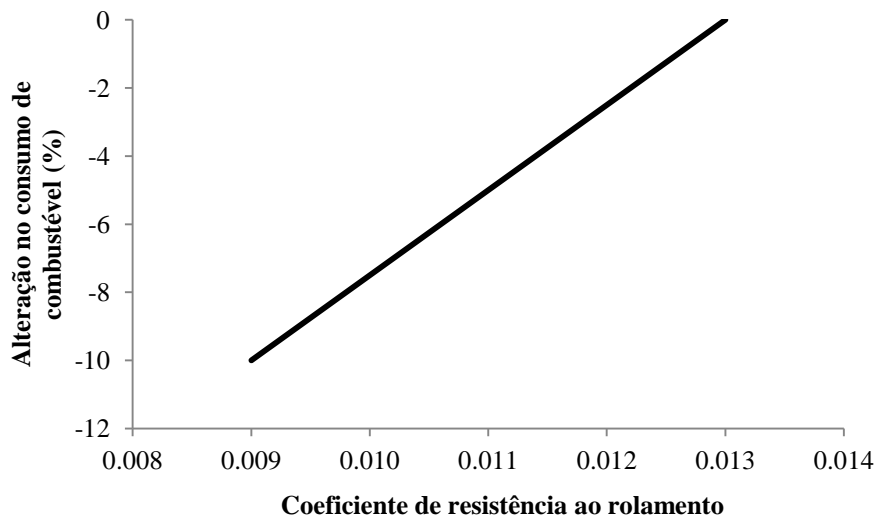


Figura 17 - Exemplo da influência das alterações na resistência ao rolamento no consumo de combustível de um veículo médio de passageiros (adaptado de Sandberg (2002)).

## 2.6 Influência da resistência ao rolamento na segurança rodoviária e ruído

As características superficiais do pavimento são também elementos de estudo ao nível da segurança. Pode ser criada alguma controvérsia entre a segurança rodoviária e a garantia ambiental, uma vez que são conceitos que divergem no que diz respeito à escolha de técnicas de produção e aplicação de pavimentos, já que as características que garantem mais segurança na circulação são opostas às características que beneficiam o ambiente, nomeadamente o consumo de combustível e a emissão de poluentes.

A segurança na circulação de veículos num pavimento rodoviário está relacionada com a camada de desgaste, sendo o atrito e a irregularidade características importantes para garantir a estabilidade do veículo (Río, 1999). O desempenho superficial do pavimento contribui assim para a segurança, e ainda para a comodidade e para os custos dos utilizadores.

A textura superficial de um pavimento constitui uma das suas mais relevantes propriedades para a qualidade funcional, quer quanto ao atrito quer no respeitante à produção de ruído (Branco *et al.*, 2008).

O contacto pneu-pavimento é claramente importante para garantir a segurança dos utentes da estrada para além da importância ambiental no aspeto do consumo energético e do ruído produzido. Para analisar as questões relativas à segurança rodoviária a aderência do pneu ao pavimento deve ser focada, e estes são dois elementos fulcrais nessa análise.

Existe um interesse público na segurança garantida pelos pneus e do seu fim de vida, assim como no consumo de combustível associado a eles. De acordo com Menzies e Zucchetto (2006), cerca de 40.000 condutores morrem em acidentes rodoviários todos os anos em veículos ligeiros ou camiões de pequena dimensão e milhares ficam em estado crítico de saúde. Assim melhorar a segurança nas estradas é um objetivo público.

A avaliação das causas que condicionam a segurança rodoviária Portuguesa aponta maioritariamente para problemas atribuídos a comportamentos inadequados dos condutores associados a falências da própria infraestrutura rodoviária (Seco *et al.*, 2008).

Uma questão importante que se deve ter em conta é se a redução da resistência ao rolamento vai levar a mudanças nas propriedades dos pneus que estão relacionadas com as viragens no movimento do veículo e no seu controlo podendo aumentar a ocorrência de acidentes e a sua severidade (Menzies e Zucchetto, 2006).

### **2.6.1 Conceito de tração**

A tração pode ser definida no âmbito da interação do pneu com a superfície em contato por tração molhada ou simplesmente por tração. A primeira corresponde à capacidade que uma roda de um veículo sujeita a uma carga tem de gerar a estabilidade do mesmo através da interação do pneu com um pavimento rodoviário molhado, enquanto o segundo define-se da mesma forma mas em condições de pavimento seco (Menzies e Zucchetto, 2006).

Conduzir envolve agora maiores riscos para o utente da estrada. As estradas devem ser projetadas atendendo à segurança, sendo importante o traçado e o tipo do pavimento (Menezes, 2008), para além da resistência ao rolamento, diferentes tipos de pavimento interferem também na tração do pneu com o pavimento, sendo fundamental para garantir a segurança na circulação.

O conceito de tração ganha importância no contexto da segurança no contacto pneu-pavimento. As características da resistência ao rolamento e tração estão relacionadas devido à grande dependência que têm da forma e constituição superficial do pneu. Embora uma grande quantidade de material que contribui para o efeito de histerese presente na camada superficial do pneu seja vantajosa na capacidade de tração, pode ser a principal fonte de resistência ao rolamento (Menzies e Zucchetto, 2006), aumentando os consumos de combustível do veículo, remetendo a questão para uma dicotomia opondo a redução dos consumos à garantia de segurança rodoviária.

### **2.6.2 Aderência do pavimento rodoviário**

A aderência ao pavimento é necessária para poder acelerar, desacelerar e mudar de direção sobre a superfície da estrada, sendo uma componente do atrito entre os pneus dos veículos e a superfície do pavimento. Quanto maior for a aderência menor será a distância de travagem.

O atrito ou resistência ao deslizamento do pavimento é um valor crítico na segurança quando o pavimento está molhado. O atrito determina-se de forma indireta medindo o coeficiente de atrito entre o pavimento artificialmente molhado e uma roda de borracha, também se pode considerar que é uma forma indireta de medir a microtextura (Río, 1999).

O coeficiente de atrito é o parâmetro que se usa para determinar o nível de contato entre o pneu e o pavimento. O seu valor depende de uma série de fatores, alguns inerentes à estrada enquanto outros são da responsabilidade do utilizador como a velocidade e o estado dos pneus do veículo, ou depende ainda de questões naturais como a chuva, neve ou gelo (Río, 1999).

O funcionamento do pavimento está ligado em muitos aspetos às suas características de textura. A capacidade de fornecer um bom nível de contato com os pneus dos veículos e de fazer evacuar a água da interface pneu-pavimento é uma missão da textura. Quanto maior for o valor da microtextura maior e melhor será a aderência entre os pneumáticos e a superfície. Em contrapartida, gera-se um maior desgaste dos pneus (Río, 1999).

A rugosidade do pavimento proporciona atrito, ou seja uma qualidade antiderrapante, quer pela interpenetração da borracha dos pneus nas asperezas do pavimento quer porque uma maior rugosidade permite maior drenagem da água superficial e mais contactos "secos" entre os pneus e as asperezas (Branco *et al.*, 2008). A interpenetração da borracha dos pneus nas asperezas do pavimento acaba por se revelar também o fenómeno responsável pela resistência ao rolamento permitindo a tração do veículo.

O coeficiente de atrito pode ser medido em dois parâmetros, o coeficiente de atrito longitudinal, e o coeficiente de atrito transversal, tendo cada um deles um interesse específico para avaliação de caso reais. O primeiro para o caso de distância de paragem, enquanto o segundo seja adequado à circulação de um veículo em curva.

O atrito pode ser medido em contínuo através de um método dinâmico ou pontualmente através do método do pêndulo britânico que é o mais utilizado principalmente para zonas específicas como intersecções, “pontos negros” ou em estudos laboratoriais, como no presente

trabalho. Este método consiste na avaliação da energia absorvida por atrito, quando uma superfície de borracha do pêndulo desliza sobre o pavimento registrando um determinado valor. O equipamento aparece representado na Figura 18:

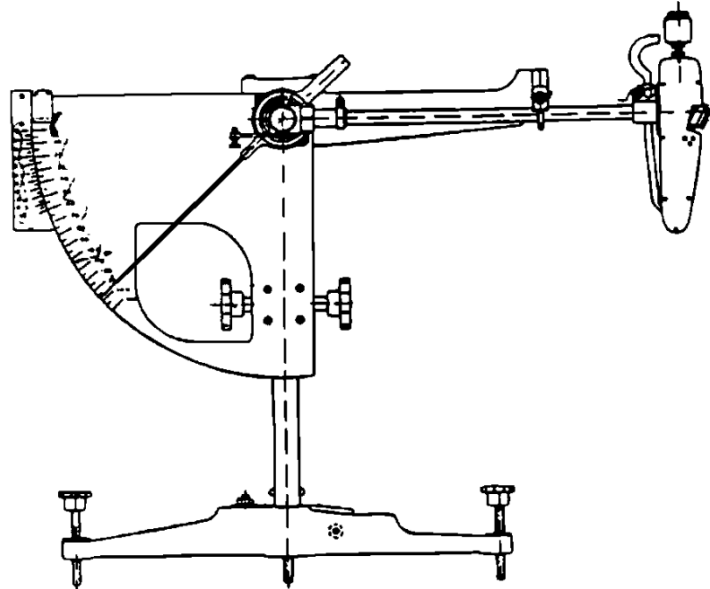


Figura 18 - Pêndulo britânico.

O método dinâmico mais utilizado tem sido o SCRIM (*Sideway Force Coefficient Routine Investigation Machine*). Este equipamento permite medir o coeficiente de atrito transversal do pavimento, em contínuo, à velocidade de 60 km/h nas estradas e 100 km/h nas autoestradas (Pereira e Miranda, 1999).



## 3 MATERIAIS E MÉTODOS

### 3.1 Introdução

O objetivo desta dissertação consiste em estudar de que forma, e com que significância, as características físicas inerentes à generalidade das misturas betuminosas podem determinar diferenças no consumo energético associado a um mecanismo constituído por uma roda que rola na superfície do pavimento, sendo o estudo focado na macrotextura (rugosidade) e no módulo de deformabilidade das misturas.

Numa situação real, o mecanismo referido pode ser o veículo automóvel, sendo ele ligeiro, pesado, com dois ou mais eixos. No entanto o estudo baseia-se na utilização do ensaio de pista (*Wheel Tracking Test*) para avaliar o consumo de energia elétrica necessária para fazer mover a roda do equipamento sobre diferentes misturas, com determinadas características superficiais e estruturais. Tratando-se de um que funciona através de eletricidade, este gera um determinado consumo de energia na movimentação da mesa onde está assente a roda com um determinado pneu que possui uma determinada forma e que aplica uma determinada carga sobre o provete suportado por essa mesma mesa. A resistência ao rolamento implícita neste mecanismo pode assemelhar-se, em certa medida, à resistência ao rolamento existente numa situação real, onde a locomoção de um veículo automóvel está associada a um determinado consumo de combustível.

Uma vez que os parâmetros em estudo passam pela textura e pela rigidez do pavimento, o critério para a escolha das misturas betuminosas a ensaiar baseou-se na possibilidade de obter misturas betuminosas que variassem tanto na profundidade média da sua textura, como também no seu módulo de deformabilidade.

Com os interesses definidos anteriormente, optou-se então pela realização de um betão betuminoso, definido pelo Caderno de Encargos (CE) da Estradas de Portugal (EP, 2012), “AC 14 surf 50/70”, sendo esta uma mistura betuminosa convencional que funciona como referência para comparação com outras duas que se produziram. Uma das misturas é um betão betuminoso com uma composição idêntica à do convencional, mas que difere no ligante utilizado, sendo este um betume modificado com polietileno de alta densidade (PEAD) no intuito de que o seu módulo de rigidez seja consideravelmente superior ao convencional, mantendo a sua textura idêntica à da mistura convencional. A outra mistura betuminosa realizada é conhecida como *Stone Mastic Asphalt* (SMA) e contém uma granulometria

particular por possuir uma elevada percentagem de agregados graúdos o que vai permitir obter uma macrotextura mais aberta na sua superfície (Horst, 2000), no intuito de obter uma mistura com um módulo de rigidez equivalente ao da mistura betuminosa convencional, e que seja significativamente diferente na rugosidade da sua superfície.

A caracterização das misturas betuminosas realizou-se com base nas normas preconizadas para determinar a sua rigidez, por ensaios de módulo (EN 12697-26). Realizou-se ainda uma caracterização superficial utilizando o método da mancha de areia (EN 13036-1) e do pêndulo britânico (EN 13036-4).

No ensaio de pista, um equipamento de leitura de consumos elétricos foi utilizado para registar os consumos obtidos aquando a realização dos ensaios de pista às misturas betuminosas. Para uma sustentação mais valorizada dos resultados obtidos com as misturas betuminosas, foram ainda realizados adicionalmente, ensaios utilizando outros materiais com várias tipologias de superfícies que pudessem evidenciar as variáveis em estudo.

### **3.2 Formulação e produção das misturas betuminosas**

O presente estudo baseou-se na utilização de três misturas betuminosas:

- Mistura convencional - AC14 surf 50/70;
- Mistura convencional modificada com PEAD - AC14 surf 35/50 + PEAD;
- “Stone mastic asphalt” - SMA 35/50 + fibras.

As misturas enunciadas vão ser referidas neste trabalho com a nomenclatura de AC14, AC14PEAD e SMA, pela ordem enunciada.

Para cada mistura definiram-se as variáveis inerentes à sua formulação, sendo elas a percentagem em betume, as temperaturas de produção e de compactação da mistura, a percentagem de PEAD utilizado na mistura AC14PEAD e a percentagem de fibras acrílicas utilizadas na mistura SMA, designadas pelo fabricante como “*Asphal+*”. Na Tabela 1 pode-se verificar as especificações técnicas enunciadas pelo fabricante das fibras (FISIPE, 2012).

Após o estudo da composição granulométrica a utilizar na mistura betuminosa, é recomendado que a formulação em laboratório (determinação da percentagem ótima em betume) das misturas betuminosas incluídas no âmbito da norma NP EN 13108-1 (betão betuminoso), seja efetuada com base no método de Marshall (EN 12967-34).



Tabela 1 - Ficha técnica das fibras *asphalt+* utilizadas na produção da mistura SMA  
(adaptado de FISIFE (2012)).

Propriedade	Critérios
Finura (dtex)	1,90
Comprimento de corte (mm)	6,12
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	1,17
Resistência à rotura (MPa)	>690
Alongamento (%)	15-20
Módulo elástico (GPa)	>12,01
Resistência ao calor	Boa - permite exposição de curta duração até 220°C
Resistência a ácidos, bases e hidrólise	Boa
Aplicações	- Camada de base de alta resistência - Construção de SMA - Técnicas de camada fina - Misturas betuminosas a frio - Camada drenante - Redução do ruído

As características dos agregados naturais utilizados neste estudo são referidas nas especificações do Caderno de Encargos (CE) tipo das Estradas de Portugal (EP, 2012). As frações de agregados naturais e filer utilizadas neste trabalho são constituídas pelas seguintes dimensões nominais: 6/14 mm, 4/10 mm, 4/6 mm, pó 0/4 mm e filer comercial.

A análise granulométrica dos agregados foi feita com base na norma EN 933-1. Na Tabela 2 é apresentada a análise granulométrica dos diferentes agregados.

Tabela 2 - Análise granulométrica dos agregados utilizados (norma EN 933-1).

Peneiro (mm)	Brita 6/14	Brita 4/10	Brita 4/6	Pó 0/4	Filer
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

Os agregados têm como principal função na estrutura do pavimento garantir resistência mecânica, sendo o ligante responsável pela sua aglomeração e flexibilidade. As partículas devem ser cúbicas e não lamelares, não finas ou não alongadas. Os agregados devem ser limpos, sem impurezas como materiais orgânicos ou argilas, pois podem reduzir o atrito entre grãos e dificultar o seu envolvimento com o ligante.

A formulação da mistura de referência em estudo (AC 14 surf 50/70) foi feita com base no fuso granulométrico especificado no anexo nacional a norma NP EN 13108-1, tendo resultado na composição apresentada na Tabela 3, enquanto a mistura betuminosa SMA foi produzida de acordo com o fuso de um betão betuminoso rugoso (pela semelhança entre ambos), cuja composição se apresenta na Tabela 4. As curvas granulométricas destas misturas são representadas respetivamente na Figura 19 e na Figura 20.

Tabela 3 - Percentagem de cada fração de agregados utilizados nas misturas AC14 e AC14PEAD.

Fração de agregado	Brita 6/14	Brita 4/10	Brita 4/6	Pó 0/4	Filer
Relação percentual	45	0	15	38	2

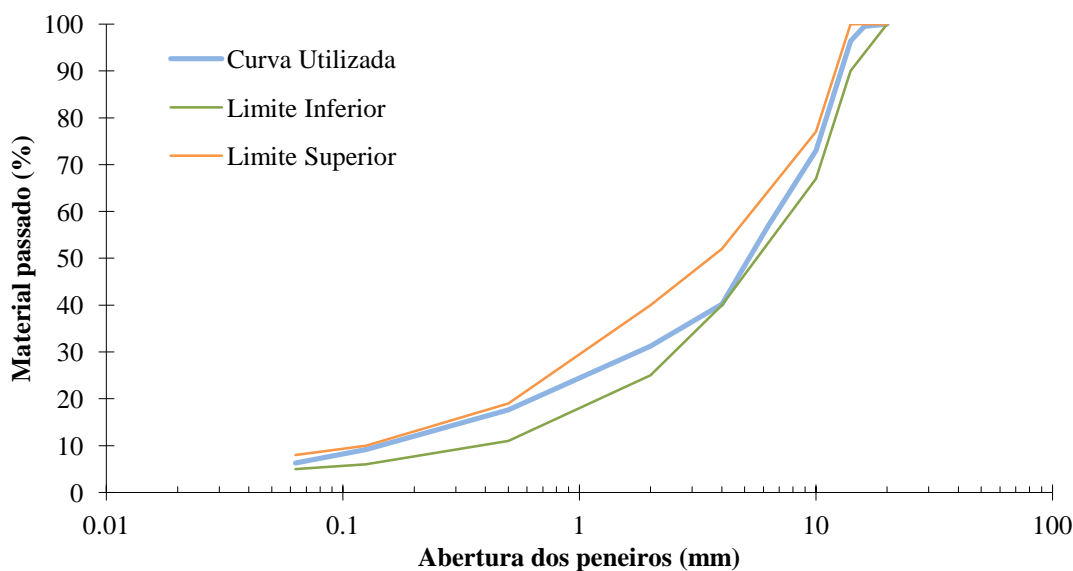


Figura 19 - Curva granulométrica da mistura de agregados das misturas AC14 e AC14PEAD e o fuso granulométrico adotado.

Tabela 4 - Percentagem de cada fração de agregados utilizados na mistura SMA.

Fração de agregado	Brita 6/14	Brita 4/10	Brita 4/6	Pó 0/4	Filer
Relação percentual	45	13	15	21	6

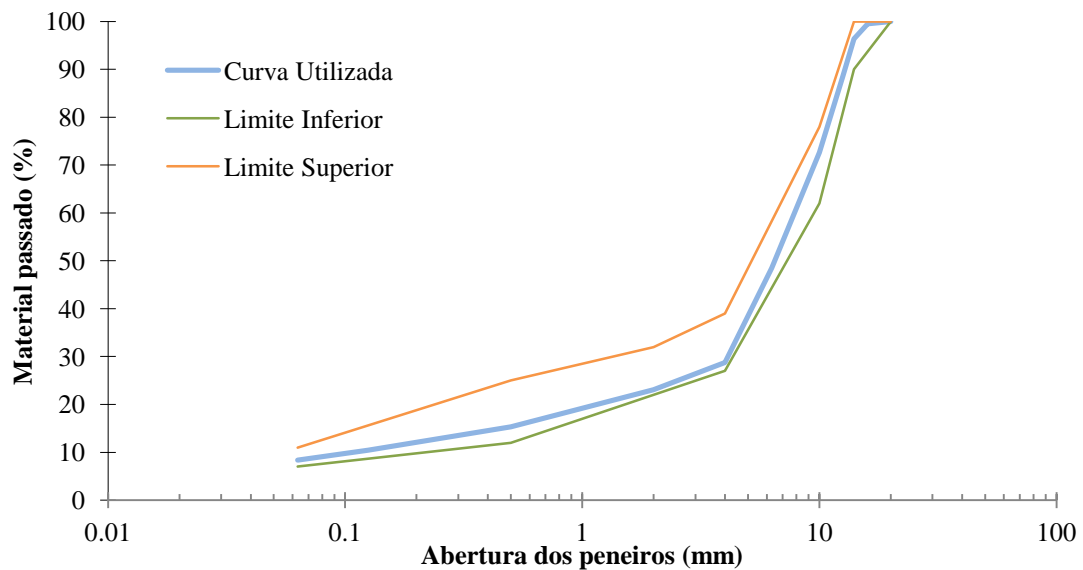


Figura 20 - Curva granulométrica da mistura de agregados do betão betuminoso rugoso e o fuso granulométrico adotado.

Com a curva granulométrica da Figura 20 foram realizadas duas misturas betuminosas, uma em que o ligante utilizado é um betume 50/70 denominada para efeitos de laboratório por mistura AC14, e outra em que o ligante é um betume 35/50 modificado com 6% de polietileno de alta densidade – PEAD (Figura 21), denominada por mistura AC14PEAD.



Figura 21 - Polietileno de alta densidade (PEAD) utilizado na modificação do betume para a mistura AC14PEAD.

Com a curva granulométrica referida na Figura 20 produziu-se o *Stone Mastic Asphalt*, que será denominada para efeitos de laboratório por SMA. Esta mistura betuminosa teve ainda a particularidade de conter fibras acrílicas (Figura 22), uma vez que neste tipo de mistura o volume de vazios é maior que o habitual devido à sua granulometria descontínua, e as fibras ajudam a reter o betume evitando o seu escorrimento. Aquando da realização da amassadura foram introduzidas na mistura betuminosa 0,3% do seu peso em fibras, tendo esta

percentagem em fibras já sido estudada em trabalhos realizados no laboratório de pavimentos da Universidade do Minho.



Figura 22 - Fibras acrílicas utilizadas na mistura betuminosa SMA.

Os teores em betumes foram definidos com base em trabalhos realizados anteriormente no laboratório para misturas betuminosas iguais às estudadas neste trabalho, uma vez que o tempo disponível não seria suficiente para realizar o método de Marshall na íntegra, chegando aos resultados apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Percentagem de betume das misturas betuminosas produzidas neste estudo.

Mistura Betuminosa	Percentagem de betume (%)
AC14 Surf 50/70	5,0
AC14 Surf 35/50 + PEAD	5,0
Stone Mastic Asphalt (SMA)	6,2

Para a produção das misturas é importante definir a temperatura do betume quando adicionado aos agregados no misturador, para isso procede-se ao seu aquecimento num equipamento adequado, como se pode ver na Figura 23. Para o betume 50/70 definiu-se 155 °C, para o betume 35/50+PEAD a temperatura teve que ser mais elevada, uma vez que o betume foi modificado, definindo-se assim uma temperatura de 180 °C para que o PEAD se possa fundir no betume modificando-o. Na mistura SMA, produzida com betume 35/50, definiu-se a temperatura de 165 °C (norma EN 12697-35). Após adicionar o betume aos agregados na misturadora (assim como as fibras no caso da mistura SMA) a amassadura foi compactada por um cilindro de rastos lisos num molde, dando origem a uma laje com 5 cm de espessura.



Figura 23 – Equipamento utilizado para aquecimento do betume.

### 3.3 Caracterização dos betumes

Os betumes utilizados para a produção das misturas betuminosas que foram alvo do presente estudo (50/70, 35/50 e 35/50 modificado com 6% de PEAD) foram caracterizados de acordo com os seguintes ensaios:

- Ensaio de penetração (EN 1426);
- Ponto de amolecimento, pelo método anel e bola (EN 1427);
- Viscosidade rotacional (EN 13302).

Para a determinação dos resultados médios apresentados na Tabela 6 utilizaram-se duas amostras do betume de modo a obter maior representatividade do resultado. Por outro lado, os resultados da viscosidade rotacional são apresentados na Figura 24

Tabela 6 - Caracterização dos betumes utilizados nas misturas betuminosas.

Betume	Penetração a 25°C (10 <sup>-1</sup> mm)	Ponto de amolecimento anel e bola (°C)
50/70	50,9	52,7
35/50	42,7	54,2
35/50 + 6% PEAD	12,1	75,2

### 3.4 Análise volumétrica das misturas betuminosas

A caracterização volumétrica baseia-se na determinação da baridade máxima teórica (BMT), da baridade aparente e da porosidade. Os provetes ensaiados resultaram do corte de cada laje em 2 lajetas de 30,1×30,1cm (Figura 25) e em 3 vigas de 6,3×5,1×38 cm (Figura 26).

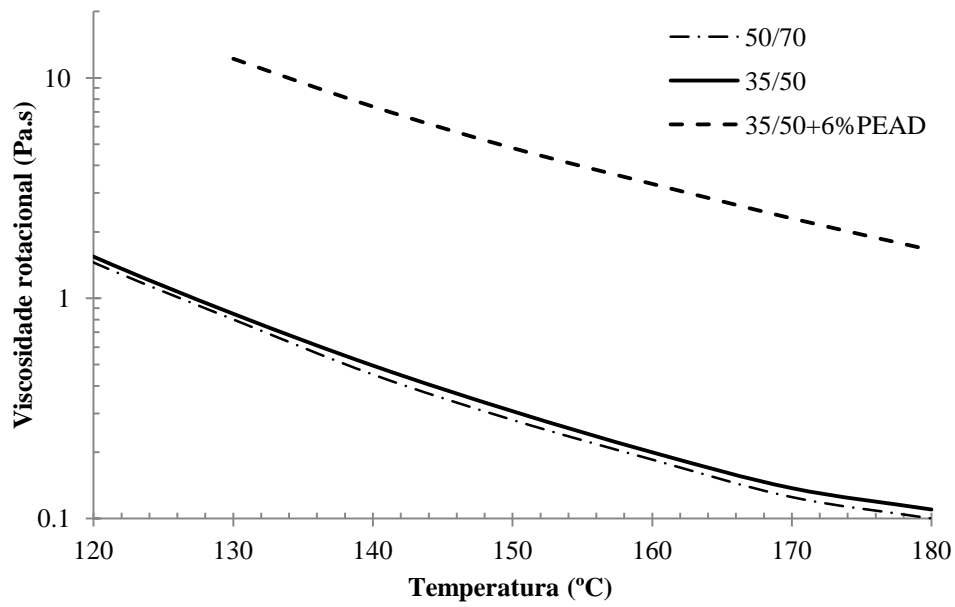


Figura 24 - Resultados do ensaio de viscosidade rotacional.



Figura 25 - Lajetas resultantes das misturas betuminosas produzidas.



Figura 26 - Vigas resultantes de cada laje de mistura betuminosa produzida.

As vigas da laje AC14 foram designadas por VBC, as vigas da laje AC14PEAD foram designadas por VBPE e as vigas representantes da laje SMA foram designadas por VSMA, enquanto as lajetas têm a designação da laje acrescentadas do número da lajeta (1 ou 2).

A BMT<sup>5</sup> das misturas betuminosas foi determinada segundo o procedimento A da norma EN 12697-5, tendo sido retirados 2 kg de cada amassadura realizada das diferentes lajes para análise pelo método do picnómetro de vácuo.

A baridade aparente foi determinada em todas as vigas e lajetas conforme a norma EN 12697-5. Foi utilizado o método das dimensões dos provetes, medindo com o auxílio de um paquímetro. Este método pode-se revelar em erros maiores e com tendência a que os valores obtidos para o volume de vazios sejam mais altos, o que acabou por se verificar uma vez que era expectável obter valores mais baixos.

Após apurar as características físicas de composição das misturas betuminosas realizadas, foram calculados os parâmetros volumétricos (EN 12697-8) das vigas e das lajetas podendo-se verificar os resultados na Tabela 7.

Tabela 7 - Parâmetros volumétricos dos elementos obtidos das misturas produzidas.

Elementos	Denominação	BMT (kg/m <sup>3</sup> )	Volume de vazios %
Vigas	VBC	2464,6	6,5
	VBPE	2453,7	5,5
	VSMA	2406,5	5,5
Lajetas	AC14	2464,6	6,5
	AC14PEAD	2453,7	7,0
	SMA	2406,5	5,5

### 3.5 Caracterização superficial das misturas betuminosas

A superfície dos pavimentos rodoviários é responsável pela aderência dos pneus dos veículos, seja pelos fenómenos do contacto com a borracha do pneu ou pela capacidade de escoar a água das chuvas que caem sobre o pavimento.

Existe então uma necessidade técnica de analisar as características da textura de uma superfície, de modo a ter a perceção das suas capacidades. Os ensaios de caracterização superficial realizados neste estudo foram a mancha de areia e o pêndulo britânico.

<sup>5</sup> Baridade Máxima Teórica.



Na Figura 27 podemos verificar as superfícies das diferentes lajetas das misturas betuminosas produzidas, antes da realização dos ensaios de pista.

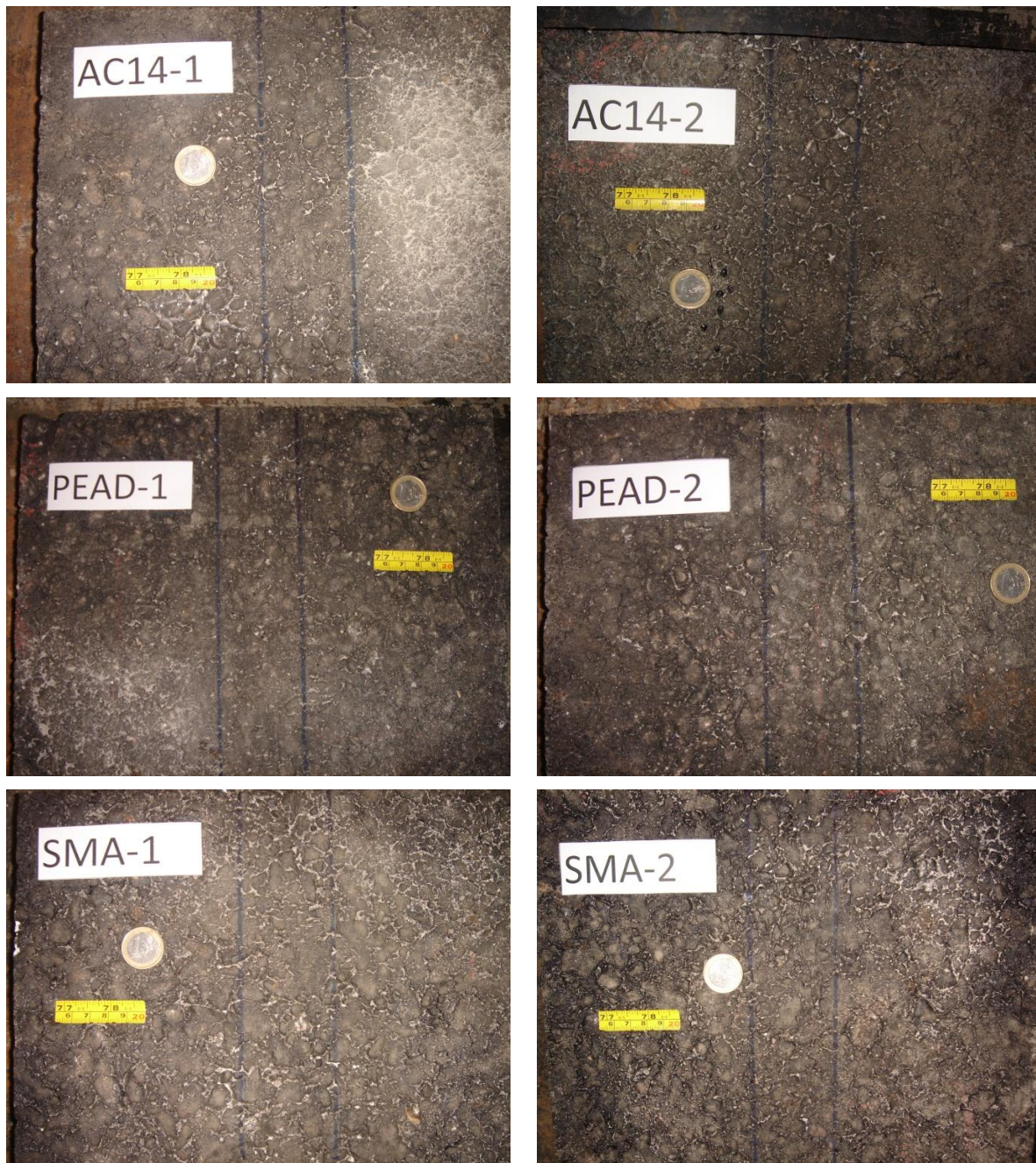


Figura 27 - Aspeto da superfície das lajetas resultantes das misturas betuminosas.

### 3.5.1 Mancha de areia

A profundidade média da textura obtém-se pela divisão de um volume de areia utilizado por uma área que resulta do seu espalhamento, e foi determinada pelo método volumétrico da mancha (EN 13036-1) onde está preconizada o espalhamento de esferas de vidro em substituição da areia fina. A superfície a ensaiar deverá estar seca e limpa.



A profundidade média da textura determinada através do método da mancha de areia é obtida pela Equação 1.

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

em que:

PMT - profundidade média da textura superficial em (mm);

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

D - Diâmetro médio do círculo obtido com o espalhamento.

A mancha que resulta do espalhamento é medida em 4 diâmetros que a representam. Neste trabalho foram também definidas 2 zonas opostas da laje para ensaiar de modo a conseguir melhor representatividade da laje, uma vez que a sua superfície pode não se encontrar totalmente homogénea (Figura 28). O volume de esferas de vidro utilizado foi de 58032 mm<sup>3</sup>.

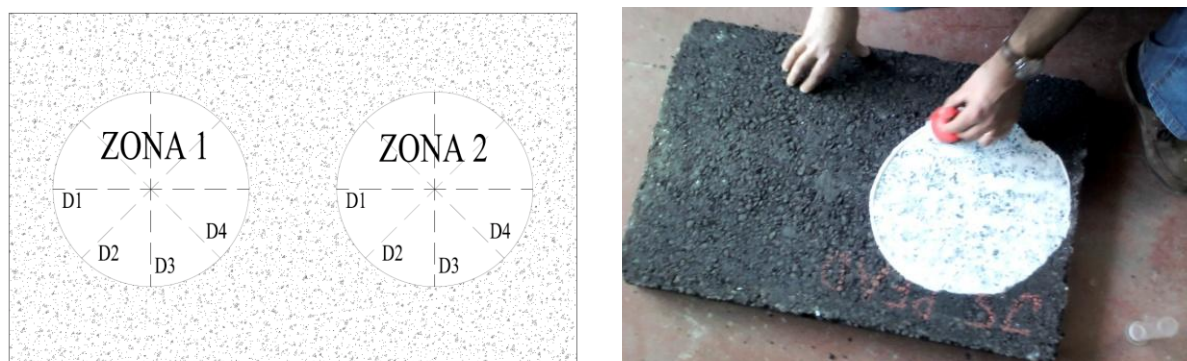


Figura 28 – Aplicação do método do ensaio de mancha de areia.

### 3.5.2 Pêndulo Britânico

O pêndulo britânico é um equipamento que avalia indiretamente a microtextura de um pavimento, o ensaio é do tipo pendular, permitindo a medição localizada do coeficiente de atrito cinemático, através da energia absorvida por atrito.

No ensaio do Pêndulo Britânico o processo foi repetido cinco vezes em 4 pontos diferentes da laje (Figura 29), de modo a recolher mais informação representativa de toda a laje. Para cada ponto são registados 5 valores do *Pendulum Test Value* (PTV), calculando-se o valor médio das cinco leituras tal como estipulado na norma EN 13036-4 pela qual o ensaio foi realizado. O PTV é uma grandeza que representa indiretamente o atrito longitudinal que se obteria entre pneu e pavimento numa travagem.

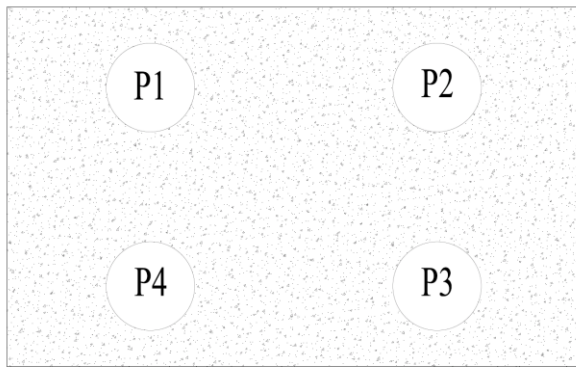


Figura 29 – Aplicação do método do ensaio de pêndulo britânico.

O atrito entre a borracha que desliza no pêndulo e a superfície ensaiada é proporcional às características de rugosidade dessa superfície.

Deve-se registrar a temperatura da água utilizada no ensaio do pêndulo britânico. A temperatura da água permite a correção do PTV devido às diferentes condições climáticas que podem ocorrer, tendo influência na medição do atrito. Utilizou-se um termômetro de infravermelhos (Figura 30) para medir a temperatura da água. O PTV é calculado para cada ponto na laje, fazendo-se uma média desses valores para caracterizar toda a laje.



Figura 30 - Termômetro de infravermelhos para verificação das temperaturas.

### 3.6 Caracterização do módulo de rigidez das misturas betuminosas

A temperatura contribui para alterações no comportamento das misturas betuminosas. As camadas betuminosas flexíveis são constituídas por um ligante que apresenta um comportamento viscoelástico. O comportamento da camada será mais viscoso para temperaturas mais altas, e mais elástico para temperaturas baixas. A frequência de aplicação

de cargas, que se relaciona com a velocidade do tráfego pesado, condiciona da mesma forma o desempenho das misturas, nomeadamente o seu módulo de rigidez.

Assim, as misturas betuminosas utilizadas neste trabalho foram caracterizadas mecanicamente através da determinação do seu módulo de rigidez segundo uma gama de frequências a três temperaturas diferentes.

O ensaio de módulo de rigidez consiste na aplicação de uma força sinusoidal numa viga prismática que se encontra apoiada em 4 pontos, em controlo de deformação. Este ensaio pode ser realizado para diferentes as condições, nomeadamente de temperatura, frequência e amplitude. O resultado consiste no módulo complexo e no ângulo de fase da mistura betuminosa.

A norma EN 12607-26 define oito tipos de ensaios para determinar a rigidez (que diferem na forma dos provetes, nos equipamento e na configuração de carga). Neste trabalho foram realizados 3 ensaios a cada viga prismática, tendo cada mistura betuminosa 3 vigas, sob três temperaturas diferentes (10, 20 e 30 °C). A gama de frequências aplicadas no ensaio consistiu em 0,1, 0,2, 0,5, 1, 2, 5, 8 e 10 Hz.

O resultado obtido do módulo de rigidez para uma determinada condição de temperatura e de frequência, advém de uma média dos valores dessas 3 vigas.

### **3.7 Ensaio desenvolvido para avaliação da resistência ao rolamento**

#### **3.7.1 Metodologia adotada no ensaio da resistência ao rolamento**

Este ensaio foi realizado no equipamento do ensaio de pista ou *Wheel Tracking Test*. Este equipamento é normalmente utilizado para analisar a deformação permanente nos pavimentos rodoviários em função do número de passagens de uma roda normalizada (ciclos), da temperatura, e da frequência de passagem. No entanto, no caso deste estudo a metodologia convencional foi adaptada para um contexto de leitura do consumo de energia elétrica no movimento da mesa pertencente ao equipamento.

Todos os materiais que foram utilizados para análise do registo do consumo energético foram ensaiados de duas formas, uma em que a roda aplica carga sobre o pavimento segundo o seu peso próprio (Figura 31), e outra em que é adicionada uma carga de 18 kg (Figura 32).

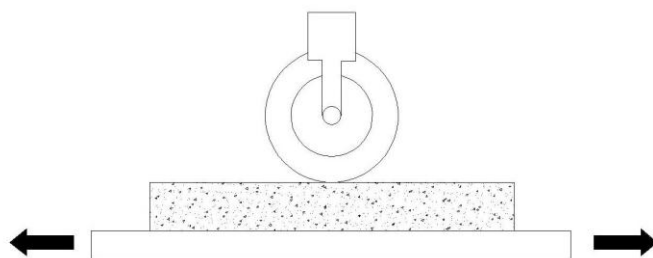


Figura 31 - Esquema do ensaio de pista (WTT) sem carga adicional.

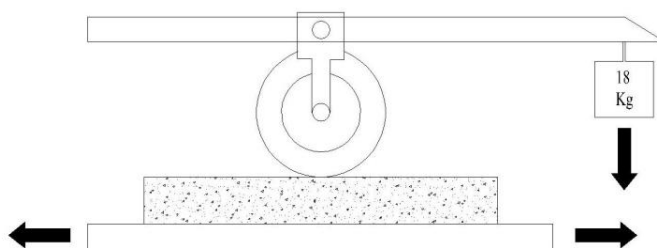


Figura 32 - Esquema do ensaio WTT com carga adicional.

No procedimento WTT a mesa que suporta os provetes em estudo movimentar-se repetidamente para trás e para a frente no eixo horizontal, com um percurso de 23 cm em cada passagem. A roda que se encontra apoiada na mesa está fixa na horizontal, podendo-se movimentar na vertical, o que possibilita o registo de irregularidades, deformações ou inclinações na superfície desse material.

Na Figura 33 pode-se observar o equipamento WTT aquando da realização de um ensaio.



Figura 33 - Ensaio de pista ou *Wheel Tracking Test*.

Um ciclo define-se pelo movimento de ida e volta ao mesmo ponto, que à frequência de 1 Hz, demora um período de 2,05 segundos a se completar. Para cada material que foi objeto de

estudo, registaram-se 1250 ciclos com e sem peso, o que resulta num tempo de ensaio de aproximadamente 43 minutos.

Em todos os ensaios foi registada a temperatura, através de um sensor inserido no interior do equipamento medindo a temperatura ambiente, uma vez que a porta do equipamento se encontrava aberta, sendo controlada pelo sistema de ar condicionado da sala.

Foi também registado o movimento da mesa através de um potenciómetro adaptado ao equipamento de ensaio WTT (Figura 34).

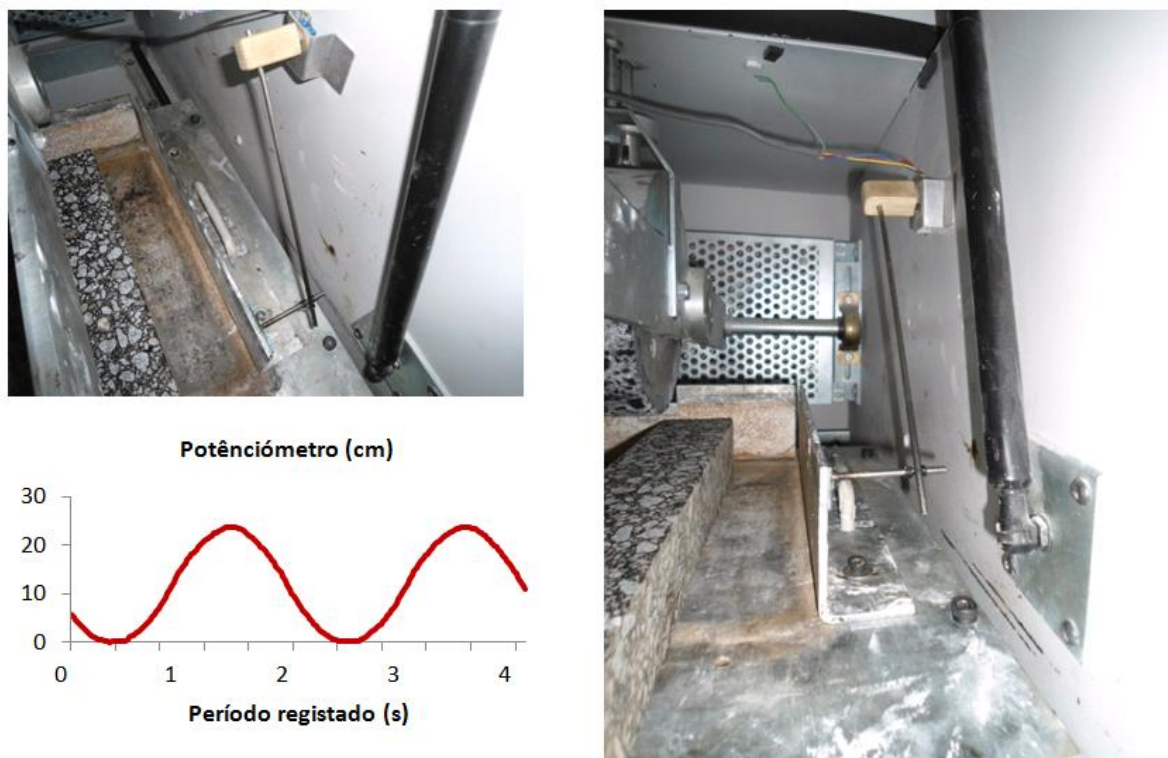


Figura 34 - Potenciómetro utilizado para avaliar a posição da laje no ensaio.

A fonte de energia do equipamento possui uma ligação a um dispositivo que foi desenvolvido para realizar registos eletrónicos (multímetro). Este dispositivo regista o consumo elétrico que passa para o motor do equipamento de ensaio de pista (WTT) que por sua vez é monitorizado no computador através de uma placa de aquisição de dados, armazenando lá a informação. Desta forma é possível monitorizar a energia consumida durante o ensaio.

Na Figura 35 pode verificar-se um esquema do emparelhamento dos equipamentos para a aquisição dos dados.



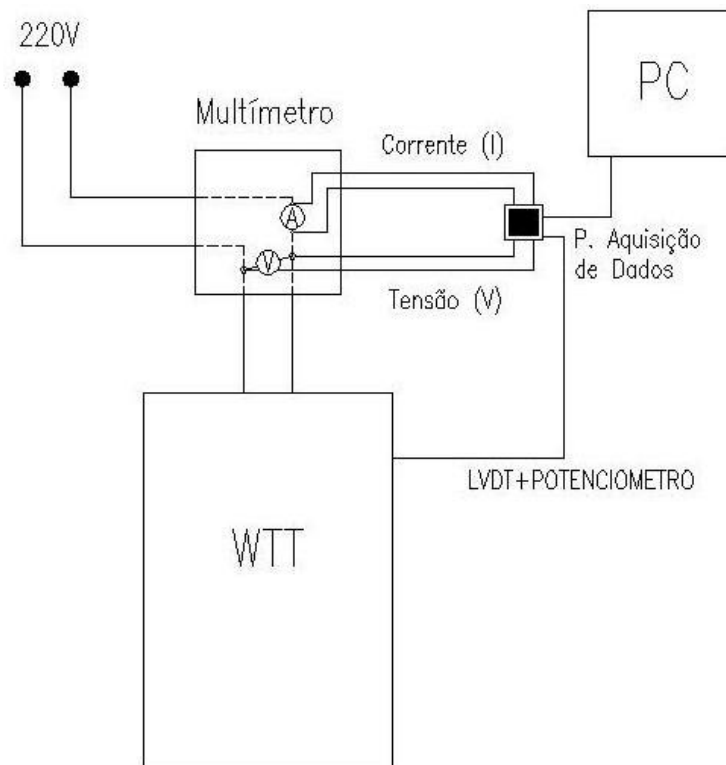


Figura 35 - Esquema do emparelhamento de equipamentos para a realização do ensaio.

Foi conectado um multímetro convencional (Figura 36) ao multímetro utilizado para as leituras de consumo energético, de modo a que se pudesse, numa primeira fase, verificar concordâncias entre os resultados. Este instrumento permitiu obter mais consistência nos resultados uma vez que se verificaram semelhanças em ambos os multímetros.



Figura 36 - Multímetro convencional usado para verificação.

Finalmente, a roda pertencente ao equipamento do ensaio WTT possui ainda um LVDT instalado que permite o registo das irregularidades ou da deformação permanente que possa existir ou ser imposta nos materiais ensaiados durante o ensaio.

### 3.7.2 Leitura e tratamento de dados dos consumos energéticos

A tensão elétrica representa a diferença de potencial elétrico entre 2 pontos de um circuito elétrico, enquanto a intensidade da corrente é o conceito da quantidade de eletricidade que passa numa determinada secção de um condutor numa unidade de tempo. As curvas de tensão e intensidade registadas no trabalho têm o aspeto apresentado na Figura 37.

Foram definidas 40 leituras no *software* para cada onda sinusoidal da tensão e da intensidade. Esta onda possui um conjunto de valores positivos e negativos que se define por um ciclo elétrico (Cunha, 1990). Como a frequência da corrente alternada (AC) pública é de 50 Hz, cada onda sinusoidal tem um intervalo de 0,02 segundos.

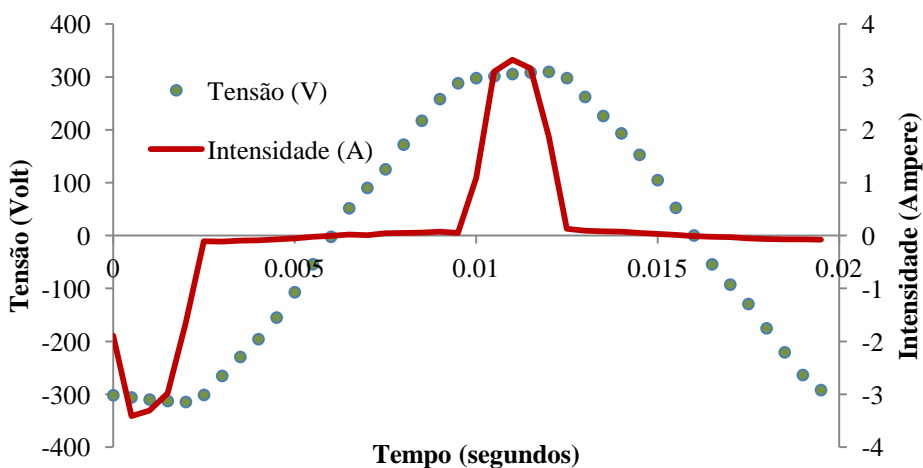


Figura 37 - Curva sinusoidal típica de um ciclo elétrico.

Os dados são registados através de um *software* específico desenvolvido em plataforma *LabView* (Figura 38), que define os seguintes parâmetros:

- tempo (segundos);
- tensão de corrente (Volt);
- intensidade de corrente (Ampere);
- temperatura (°C);
- posição da mesa (centímetros);
- deformação da superfície (milímetros).

Na Figura 38 pode verificar-se mais concretamente o registo da onda sinusoidal da tensão elétrica em Volt (1), assim como a onda da intensidade de corrente em Ampere (2), o número de ciclos registado (3) e o número de ciclos entre cada registo (4). Finalmente pode verificar-se a temperatura do ensaio e a posição da mesa em (5) e (6) respetivamente.

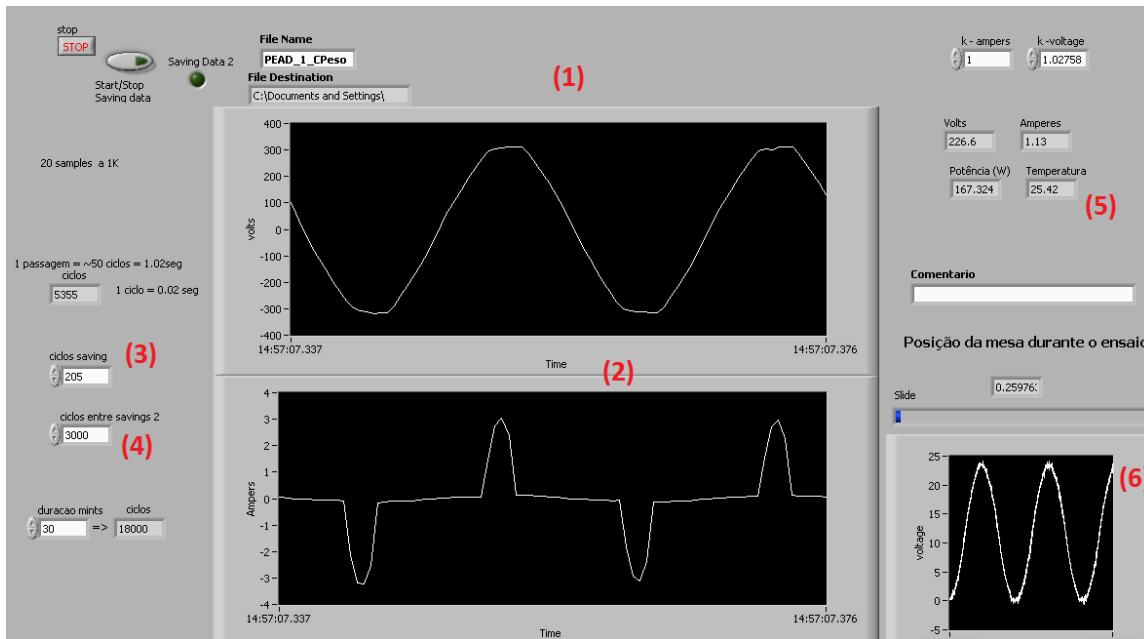


Figura 38 - *Software* desenvolvido no programa *LabView* para aquisição de dados.

O objetivo fundamental da leitura do consumo energético é determinar a potência para cada ciclo elétrico. Esta é uma grandeza que pode ser quantificada de várias formas, para variados fins. A potência pode resultar em Volt-ampere (VA) ou Watts (W), onde a primeira traduzirá uma potência aparente, e a segunda uma potência real. Define-se a potência real por aquela que produz trabalho e gera calor, sendo por este método que se quantifica a energia que é gerada ou consumida.

O valor da potência em VA determina-se pelo método de *Root Mean Square* (RMS). Este método está representado na Equação 2.

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} * \Sigma waveform (i^2)} \quad (2)$$

Em que:

RMS - Valor de ciclo pelo método *Root Mean Square*;

n - número de pontos registados para definir a onda;

i - valor correspondente à onda sinusoidal (Volt ou Ampere).

Tendo isto chega-se ao valor da potência para um ciclo elétrico através da Equação 3. Este é um resultado que define um consumo mais simplista, e não correspondendo ao consumo real. No entanto, este método é adequado para dimensionamento de circuitos elétricos.

$$VA = V_{RMS} * I_{RMS} \quad (3)$$



Optou-se por calcular a potência pelo ciclo médio, e fez-se uma comparação com os valores registados num aparelho de medição convencional (Figura 36), verificando-se que eram semelhantes. O ciclo médio tem por base a multiplicação da tensão instantânea  $V(t)$  pela intensidade instantânea  $I(t)$  e resulta na potência instantânea  $P(t)$ , de acordo com a Equação 4.

$$P(t) = V(t) * I(t) \quad (4)$$

Os resultados da potência instantânea, que são 40 em cada ciclo elétrico, traduzem um consumo real da energia para um instante, e a Equação 5 permite obter um valor médio de cada ciclo. O conjunto dos valores resultantes dos ciclos elétricos demonstra um comportamento da potência consumida num determinado período de tempo através de uma curva (Figura 39). A integração dessa curva, ou seja, a área abaixo da curva (Figura 40) permite obter a energia consumida (Equação 6), calculada em Joule.

$$\text{Cycle Average} = \frac{1}{n} * \sum \text{waveform} (i) \quad (5)$$

$$\text{Energia Consumida} = \int_0^t P(t)dt \quad (6)$$

Em que:

Cycle Average - Valor médio da potência consumida (W);

n - número de pontos registados para definir a onda;

i - valor correspondente à onda da potência (W);

t - período de tempo registado;

$P(t)$  - potência instantânea (W).

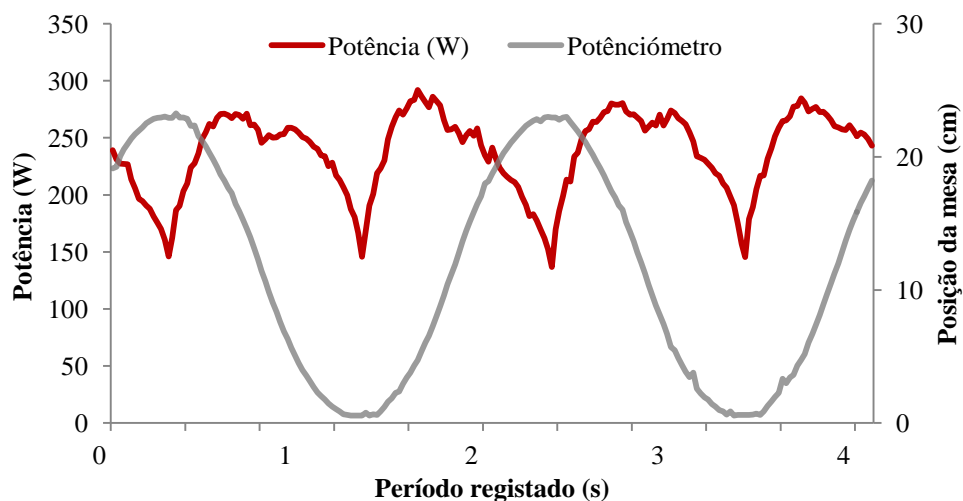


Figura 39 - Exemplo do comportamento da curva dos consumos energéticos e do movimento da mesa (medida com o potenciómetro) num ensaio WTT.

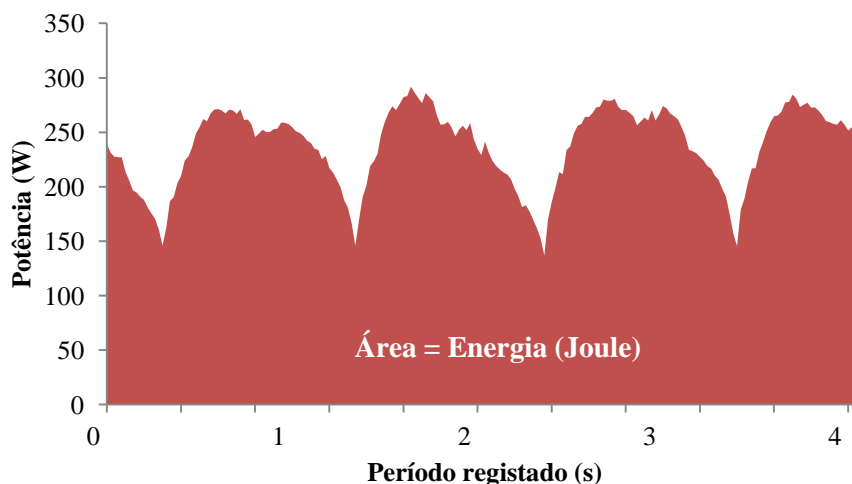


Figura 40 - Cálculo da energia consumida pela área abaixo do gráfico.

Após a obtenção do valor da energia consumida em Joule pelo tempo de ensaio registado, 2 ciclos (4,1 s), dividiu-se a energia pelo tempo, de modo a obter a média de consumo energético por cada segundo (Joule/s).

### 3.7.3 Metodologia da análise ao ensaio de resistência ao rolamento

Como se pode ver no exemplo apresentado anteriormente (Figura 39 e Figura 40), foi considerado um período de tempo de 4,1 segundos, correspondente a 2 ciclos mecânicos do ensaio WTT (vai e vem). Também é evidente a variação da potência instantânea em função do movimento da mesa, verificando-se consumos diferentes para diferentes momentos do ciclo.

Para cada material analisado foram registados 4,1 segundos de cada minuto de ensaio, pelo *software* de leitura, ou seja os 2 primeiros ciclos mecânicos de cada minuto. Cada ensaio prolongou-se até aproximadamente 43 minutos correspondendo a aproximadamente 1250 ciclos mecânicos do WTT. No entanto para este estudo, optou-se pela seleção de apenas 5 períodos de análise em cada ensaio, verificando-se então o comportamento da potência consumida nos minutos, 2, 10, 20, 30 e 40.

Na verdade as análises a estes períodos foram mais rigorosas, de modo a obter maior consistência nos resultados. Cada período resulta de uma média realizada entre os 2 ciclos registados do próprio minuto em questão e os 2 ciclos registados nos minutos adjacentes, sendo cada valor obtido de energia consumida a média entre 3 minutos consecutivos que correspondem a 6 ciclos mecânicos (vai e vem). A título de exemplo, o valor obtido para o minuto 20 corresponde à média dos ciclos mecânicos registados ao minuto 19, 20 e 21.

Deste modo, para cada material ensaiado, foram registados 5 valores de energia consumida ao longo do ensaio, permitindo observar um determinado comportamento do consumo energético ao longo do tempo. Como se verificou teoricamente no Capítulo 2, existem vários fatores que podem influenciar os consumos como a temperatura do pneu, ou uma possível alteração da textura da superfície que está a ser ensaiada, logo foi dada importância a uma análise de alterações de consumo durante o ensaio. Foram também realizadas análises comparativas entre os diferentes materiais para perceber qual a influência das suas características nos consumos energéticos que serão apresentadas no Capítulo 4.

Uma vez que a carga aplicada sobre a mesa que se movimentava sob o pneu por si só influencia o consumo de energia, teve-se o cuidado de realizar o ensaio sem a superfície do material a ensaiar estar em contacto com o pneu, este ensaio demorou cerca de 10 minutos, com o objetivo de registar a energia consumida apenas para suportar a carga imposta na mesa em cada ensaio, uma vez que para cada material em estudo a mesa está carregada com pesos diferentes, desprezando assim o contacto pneu/superfície. A este consumo deu-se a denominação de “consumo básico”.

Este método permite obter apenas o acréscimo de energia consumida que é necessário para ultrapassar a resistência no contacto do pneu com a superfície do material e este valor revela-se neste trabalho de primordial importância, uma vez que este tem como objetivo estudar a resistência ao rolamento. Na Figura 41 e na Figura 42 pode-se verificar a título de exemplo, num período de dois ciclos mecânicos, o acréscimo de consumo necessário no contacto pneu/superfície, verificando-se um comportamento da curva idêntico.

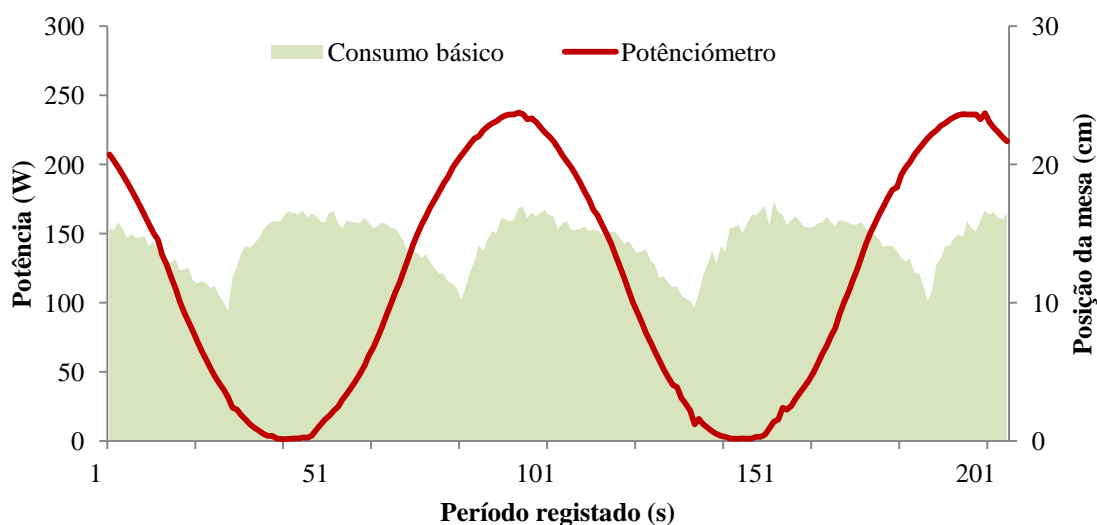


Figura 41 - Exemplo de um ensaio sem contacto da roda com a superfície do material.

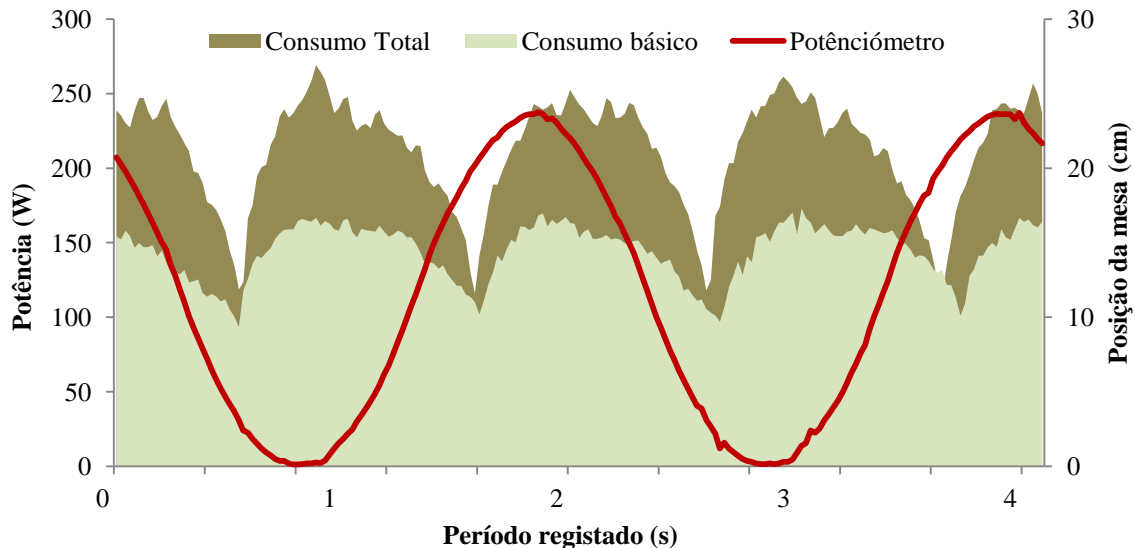


Figura 42 - Exemplo de um ensaio com a representação do consumo total onde a roda está em contacto com a superfície do material.

O acréscimo de energia consumida será a diferença entre o consumo total e o consumo básico, e este será o valor primordial para análise aos ensaios.

### 3.8 Estudo da influência da temperatura na resistência ao rolamento

Neste trabalho foi definida uma análise aos consumos de energia registados ao longo de um ensaio onde a temperatura na lajeta ensaiada fosse subindo gradualmente. O aumento da temperatura reduz o módulo de rigidez do provete e pode provocar alterações da macrotextura na zona de passagem do pneu. Estas alterações mecânicas da laje podem revelar uma variação do comportamento “típico” nos consumos energéticos.

Este ensaio foi realizado com um procedimento semelhante ao anterior, nas segundas lajetas de cada mistura betuminosa em estudo. O ensaio foi realizado com mais 10 minutos do que o ensaio a frio, na tentativa de obter deformações na macrotextura e para que a temperatura da laje pudesse atingir valores mais elevados.

Recorreu-se a uma forma de aquecimento (uma resistência elétrica associada a uma ventoinha) que não estivesse associado ao equipamento WTT, para que esta não aumentasse o consumo energético devido à fonte de aquecimento. A temperatura foi controlada por um sistema de aquecimento externo a 40 °C (Figura 43), embora esta temperatura não tenha sido atingida pela lajeta durante o tempo efetivo de ensaio. Foi ainda introduzida uma sonda dentro da lajeta para registar a temperatura no seu interior.



Figura 43 - Ensaio de resistência ao rolamento com aquecimento.

Neste procedimento foi utilizada a carga adicional de 18 kg do ensaio WTT, para que ocorresse mais deformação, e como se pretendia subir a temperatura da lajeta estas foram aplicadas na mesa com gesso, para evitar o movimento ou deslizamento do material.

O procedimento relativo às leituras dos consumos energéticos foi o mesmo que foi adotado no ensaio WTT sem o aumento de temperatura.

Tendo o ensaio sido mais demorado (55 minutos) que os anteriores, adicionou-se mais um período de análise que se situa no minuto 50 (analisado como os restantes períodos).

### **3.9 Caracterização dos materiais de calibração**

Para além das lajetas de mistura betuminosa, foram utilizados outros materiais nos ensaios com características mais evidenciadas, de modo a poder estudar isoladamente propriedades como a rigidez, e a textura. Estes dados permitem dar uma maior sustentabilidade ao estudo na tentativa de verificar se as tendências esperadas se confirmavam.

Os materiais utilizados foram seleccionados de modo a obter, um material de textura inexistente (liso) e um material de textura elevada para poder obter uma tendência para este parâmetro. Foi utilizado ainda um material muito rígido e outro pouco rígido para que o parâmetro da rigidez fosse também analisado. Adicionalmente realizaram-se ensaios em que a superfície do material apresentava uma determinada pendente, fazendo esta variar para se poder analisar a influência que a inclinação longitudinal dum pavimento rodoviário tem no consumo devido aumento da resistência ao movimento.

### 3.9.1 Viga metálica lisa

Este ensaio foi realizado com uma viga em alumínio de superfície totalmente lisa (Figura 44). Isto significa que os consumos registados correspondem a um material com um módulo de rigidez muito elevado em relação a uma mistura convencional e que é desprovido de textura.



Figura 44 - Ensaio realizado sobre uma viga em alumínio de superfície lisa.

Como já foi referido anteriormente, a carga existente na mesa foi contabilizada de forma independente no que diz respeito aos consumos energéticos. Por questões logísticas e das próprias características dos materiais em estudo, cada ensaio contribui com uma determinada carga aplicada na mesa do WTT. A viga metálica de alumínio tem um peso de 3,7 kg. O ensaio foi realizado primeiro sem o peso adicional do WTT e depois com o peso adicional.

### 3.9.2 Superfície de borracha

O ensaio com a superfície de borracha é tal como o ensaio com a viga metálica lisa, um ensaio onde a textura não tem qualquer influência nos consumos energéticos, uma vez que esta é inexistente, mas onde se prevê haver uma maior resistência ao rolamento. Consistiu na utilização da mesma viga de alumínio (3,7 kg), mas com a colocação de uma fina membrana de 1 mm borracha (Figura 45) em cima desta, com mais 2 vigas de mistura betuminosa para ajudarem no apoio à membrana. Assim, a carga total aplicada na mesa foi de 9,3 kg.





Figura 45 - Membrana de borracha utilizada no ensaio.

Este ensaio teve como objetivo o registo de consumos energéticos para uma superfície de contacto mais flexível, embora se pudesse utilizar uma espessura de borracha superior para se simular de forma mais efetiva a redução do módulo. O ensaio foi realizado primeiro sem o peso adicional do WTT e depois com esse peso.

### 3.9.3 Superfície rugosa (chapa-xadrez)

Numa fase seguinte selecionou-se um material de características rugosas, para poder estabelecer uma tendência nos consumos em função da rugosidade. Assim, escolheu-se um material conhecido comercialmente como chapa-xadrez (Figura 46).



Figura 46 - Chapa-xadrez utilizada no ensaio.

A carga aplicada na mesa corresponde à própria chapa-xadrez, e mais 6 vigas de mistura betuminosa que serviram para apoiar e estabilizar a chapa no movimento da mesa (Figura 46). O peso total do conjunto é de 25.2 kg. As dimensões dos losangos presentes na superfície do material são apresentadas na Figura 47.

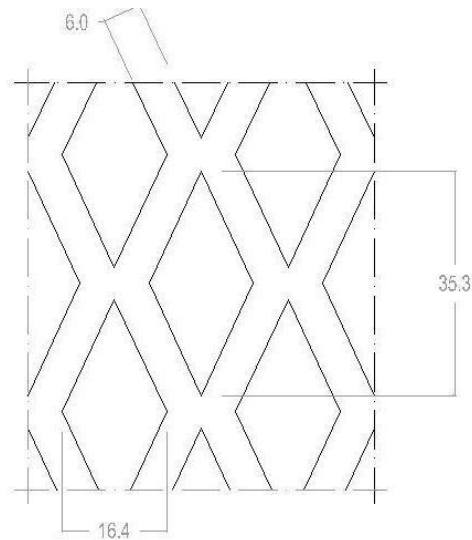


Figura 47 - Dimensões dos losangos da chapa-xadrez (mm).

Ainda se realizou o ensaio de mancha de areia na superfície da chapa-xadrez segundo a norma EN 13036-1 preconizada para superfícies de pavimentos rodoviários, de modo a conhecer a profundidade média da textura da chapa (Figura 48).

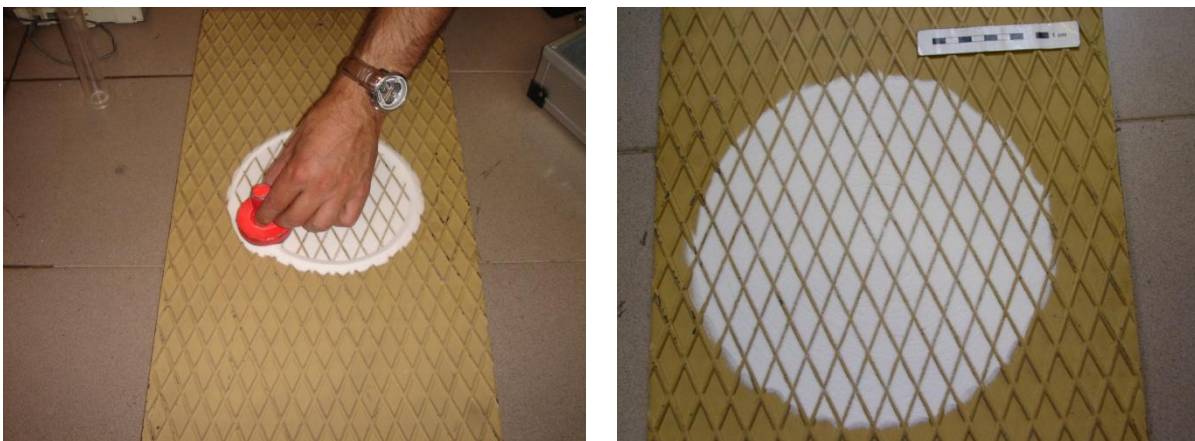


Figura 48 - Ensaio de mancha de areia realizado na chapa-xadrez.

O ensaio para medição dos consumos foi realizado primeiro sem o peso adicional do WTT e depois com o peso adicional.

### 3.9.4 Rede metálica

Selecionou-se uma rede metálica para realizar o ensaio uma vez que esta obtém uma textura evidenciada que pode revelar comportamentos diferentes nos consumos energéticos. Essa rede tem a configuração apresentada na Figura 49. O peso total neste conjunto é de 15.24 kg.



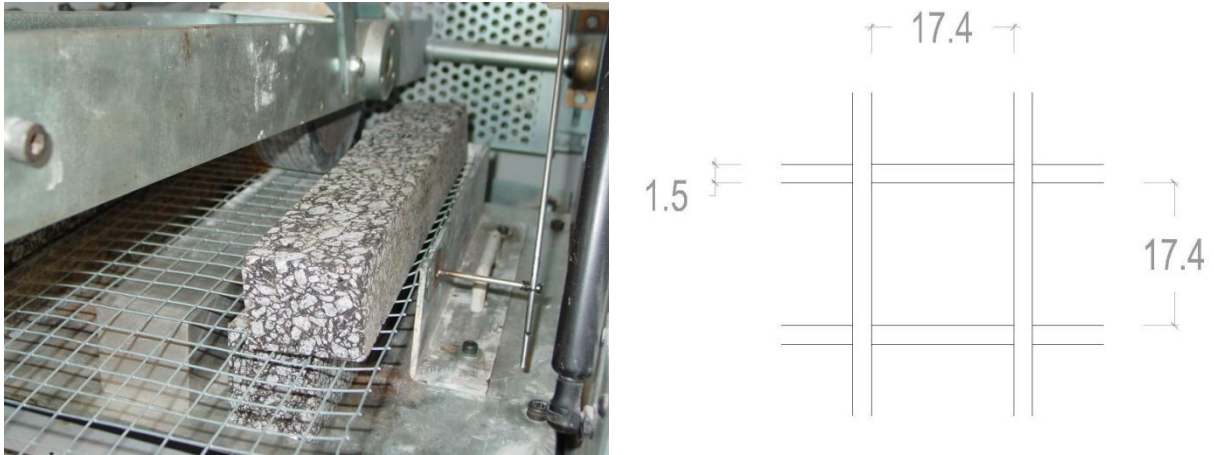


Figura 49 - Rede metálica utilizada no ensaio WTT (medidas em mm).

O ensaio com a rede metálica foi realizado primeiro sem o peso adicional do WTT e depois com o peso adicional.

### 3.9.5 Superfície inclinada

Foram ainda estudadas superfícies com pendentes diferentes, nomeadamente 1% e 2,75% (Figura 50), com o objetivo de poder analisar o efeito da resistência ao movimento causada pela inclinação longitudinal dos pavimentos rodoviários e a sua influência nos consumos energéticos, de modo a verificar se existe uma tendência.

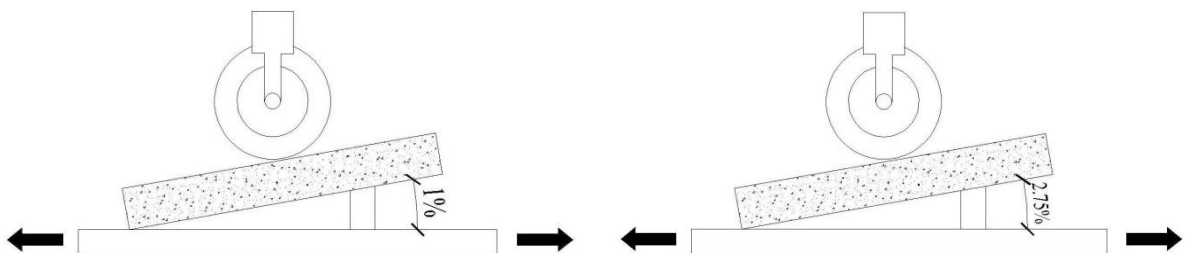


Figura 50 - Esquema de ensaio utilizado para superfícies inclinadas.

Este ensaio foi realizado com a viga metálica lisa já utilizada noutras condições, onde se introduziram pequenas peças metálicas por baixo da viga para garantir a inclinação desejada (Figura 50, 51 e 52), levantando uma das extremidades da viga sobre a qual a roda se desloca. A carga aplicada na mesa neste caso é de 3.7 kg. O ensaio foi realizado primeiro sem o peso adicional do WTT e depois com o peso adicional.



Figura 51 - Viga de alumínio com 1% de inclinação.



Figura 52 - Viga de alumínio com 2,75% de inclinação.

### 3.10 Metodologia de determinação de textura localizada

Apesar de terem sido realizados ensaios de mancha de areia convencionais que permitiram obter a caracterização superficial da macrotextura de cada laje produzida, foram ainda realizados ensaios adaptados para determinar essa característica para a área de passagem da roda no ensaio de *Wheel Tracking Test*. Para isso realizou-se uma mancha de areia localizada no retângulo de passagem da roda, que foi marcado com marcador na laje, com o objetivo de reconhecer alterações da profundidade média da textura antes e após o ensaio no WTT da leitura de consumos (Figura 53).



Figura 53 - Ensaio de mancha de areia localizada.

O método utilizado consiste no espalhamento das esferas de vidro na área de passagem da roda do *Wheel Tracking Test* cuidadosamente, preenchendo as irregularidades da superfície do provete.

Sabendo que um volume de esferas de vidro corresponde a um determinado peso, é possível obter o volume de esferas de vidro que foi necessário para preencher as irregularidades da superfície da lajeta desde que seja feita uma pesagem ao recipiente com as esferas, antes e depois do espalhamento. Tendo isto, para todos os ensaios encheu-se totalmente o recipiente tendo um volume já definido pelo método convencional de  $58032 \text{ mm}^3$ , este volume corresponde a aproximadamente 157 g (Figura 54), ao pesar novamente o recipiente depois do espalhamento é possível determinar o volume de esferas que está a preencher as irregularidades.



Figura 54 - Massa do recipiente com as esferas de vidro antes e após o espalhamento.

Seguidamente é necessário quantificar a área de espalhamento. O método utilizado consiste em fotografar toda a lajeta com uma câmara fotográfica de alta resolução (Figura 53). Com a imagem obtida à escala mede-se a área da mancha em *AutoCad*, que é definida pelo contorno da mancha. Assim obteve-se o volume de esferas de vidro utilizadas e a área de espalhamento, e com estes dados determinou-se a profundidade média da textura.

Este processo foi repetido após o ensaio com o objetivo de reconhecer alterações que podem ter surgido na textura da zona de passagem do pneu, após a lajeta ter sido submetida ao ensaio no WTT, e desta forma verificar se essas alterações poderiam ter influência no consumo de energia. Para obter mais rigor foi realizada a limpeza das lajetas antes do ensaio WTT com ar comprimido, para retirar as areias e pó.



## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Caracterização dos materiais

#### 4.1.1 Mancha de areia

As lajes em estudo foram ensaiadas com o ensaio de mancha de areia de modo a obter a altura média de areia em cada superfície. Estes resultados (Tabela 8) são importantes para determinar a rugosidade nas lajes, para se poder analisar as diferenças entre elas. A chapa xadrez foi um dos materiais de calibração onde também se realizou este ensaio, por ter uma superfície de grande irregularidade. Considerou-se que a superfície metálica por ser lisa tem um valor MPD nulo.

Tabela 8 - Profundidade média de textura no ensaio de mancha de areia.

Superfície	MPD (mm)
Metálico liso	0,00
AC14	0,85
AC14 PEAD	0,75
SMA	0,95
Chapa xadrez	1,10

Os resultados do ensaio de mancha de areia nas lajes produzidas encontram-se dentro do expectável, embora fosse esperado uma maior diferença entre a laje convencional AC14 e a laje SMA, uma vez que esta última foi concebida para ser mais rugosa do que as restantes.

Em suma, a macrotextura da laje AC14 encontra-se ligeiramente abaixo da SMA, tal como pretendido, embora se esperasse uma diferença mais evidente. A laje AC14PEAD é a laje menos rugosa, embora com um valor próximo da AC14. O erro associado a este tipo de ensaio pode ainda ser significativo, uma vez que a laje compactada em laboratório pode não se apresentar totalmente homogénea, como consequência de ocorrer alguma variação no espalhamento realizado manualmente por um operador.

A chapa xadrez apresenta uma profundidade média de textura mais elevada que as restantes, tal como seria de esperar tendo em conta as dimensões das irregularidades presentes na sua superfície. Em oposição encontra-se a superfície metálica lisa, para a qual se pode deduzir que a altura média de areia é igual a 0 mm.

#### 4.1.2 Pêndulo britânico

O pêndulo britânico permite obter valores que podem ser correlacionados com o coeficiente de atrito que uma superfície possui, dando assim um indicação sobre a resistência à derrapagem que cada superfície pode garantir. Estes valores são designados por *Pendulum test value* (PTV) e apresentam-se na Tabela 9.

Tabela 9 - Resultados do ensaio do pêndulo britânico.

Superfície	PTV
AC14	66
AC14PEAD	60
SMA	69

Em princípio espera-se que para texturas mais rugosas o valor PTV seja mais elevado. Os resultados obtidos estão dentro desse pressuposto, sendo que a laje SMA obteve o maior valor de atrito, embora com um valor próximo do atrito na laje AC14, enquanto a laje AC14PEAD apresentou o valor de atrito mais reduzido. É visível que a altura média de areia, determinada no ensaio de mancha de areia, é proporcional aos valores de PTV.

#### 4.1.3 Módulo de rigidez

Os resultados do módulo de rigidez e do ângulo de fase para os três tipos de misturas betuminosas foram obtidos de acordo com a norma EN 12697-26.

A seleção das temperaturas associadas ao ensaio de módulo de rigidez deve ser feita com base no objetivo associado ao estudo, e deve simular, da melhor forma possível, o caso real em obra. No caso deste trabalho foi importante definir uma gama de temperaturas variáveis, as quais seriam expectáveis de se verificar posteriormente no ensaio de resistência ao rolamento (que foi realizado à temperatura ambiente). Como houve inicialmente alguma incerteza sobre a altura do ano em que seriam realizados estes ensaios, optou-se por ensaiar três temperaturas de modo a abranger quaisquer possibilidades (por interpolação) acerca da temperatura que se podia encontrar no laboratório durante os ensaios de avaliação do consumo.

Assim, realizaram-se ensaios para três temperaturas diferentes em três vigas de cada mistura betuminosa em estudo. O módulo de rigidez a diferentes frequências foi determinado às temperaturas de 10 °C (Figura 55), de 20 °C (Figura 56) e de 30 °C (Figura 57).



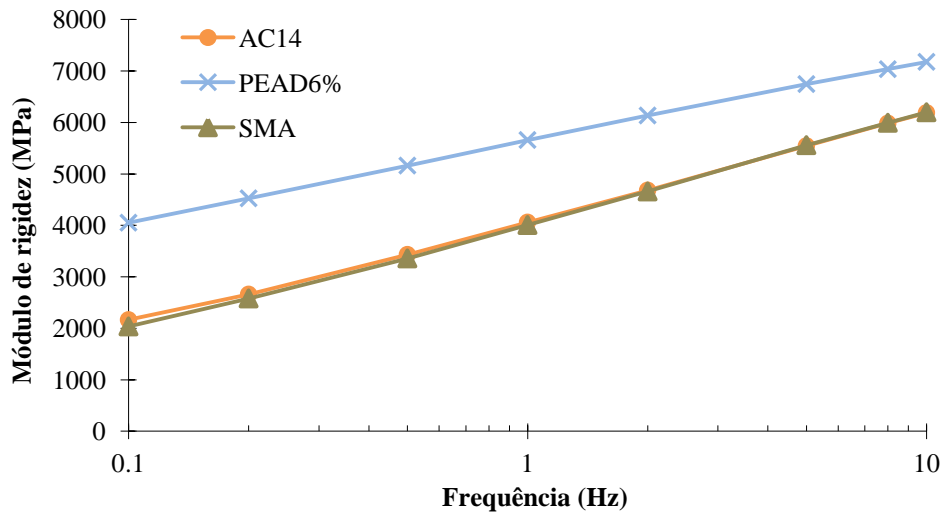


Figura 55 - Módulo de rigidez das misturas betuminosas a uma temperatura de 10 °C.

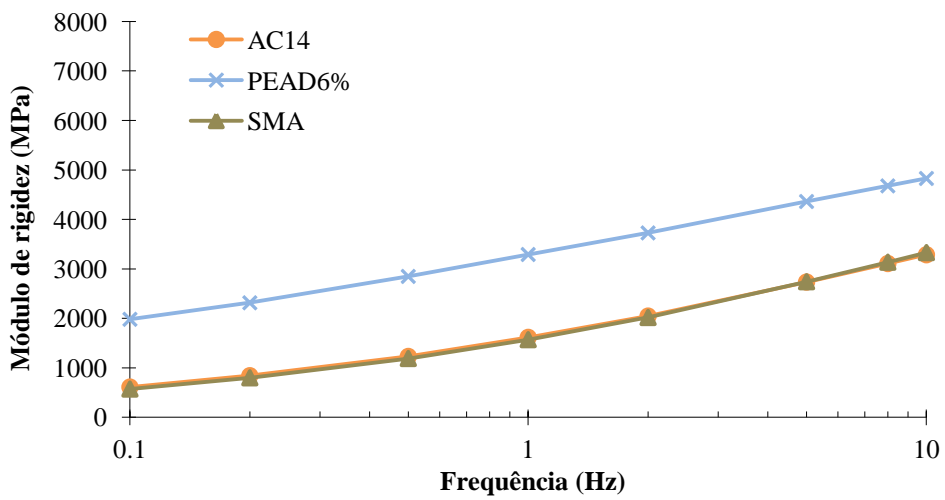


Figura 56 - Módulo de rigidez das misturas betuminosas a uma temperatura de 20 °C.

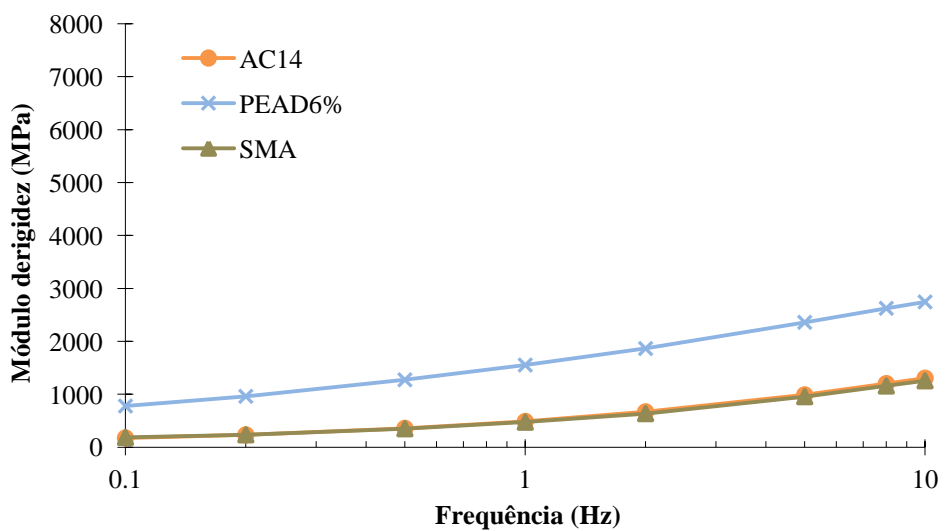


Figura 57 - Módulo de rigidez das misturas betuminosas a uma temperatura de 30 °C.

As misturas realizadas tiveram resultados de módulo de rigidez dentro do que se esperava, uma vez que foi atingido o objetivo de formulação de conseguir que as misturas AC14 e SMA tivessem módulos de rigidez semelhantes, sendo estes claramente inferiores ao módulo de rigidez da mistura AC14PEAD (propositadamente modificada para atingir esse objetivo). As misturas foram formuladas desta forma para que seja possível avaliar a influência deste parâmetro (rigidez) nos consumos energéticos a estudar. No entanto, convém referir que de uma forma geral os módulos de rigidez foram reduzidos, pois tomando como exemplo a mistura AC14 era esperado um módulo de rigidez superior a 4000 MPa, a 20 °C e a 10 Hz.

O ensaio de módulo também permite obter o ângulo de fase a diferentes frequências, cujos resultados são apresentados nas Figura 58 (10 °C), Figura 59 (20 °C) e Figura 60 (30 °C).

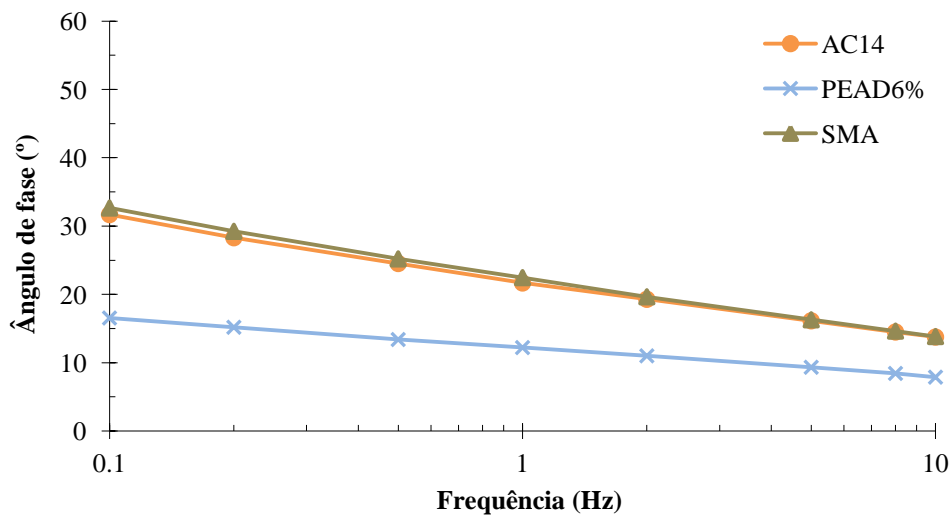


Figura 58 - Ângulo de fase das misturas betuminosas a uma temperatura de 10 °C.

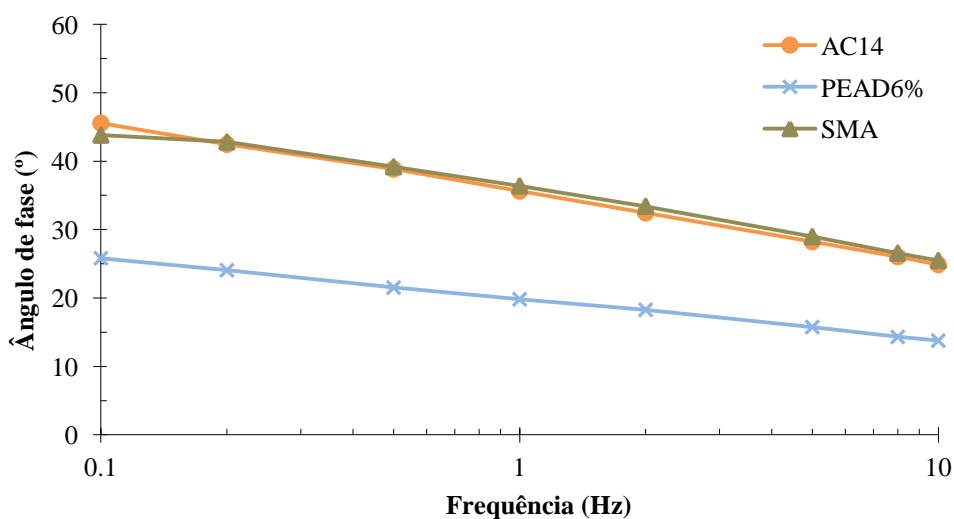


Figura 59 - Ângulo de fase das misturas betuminosas a uma temperatura de 20 °C.



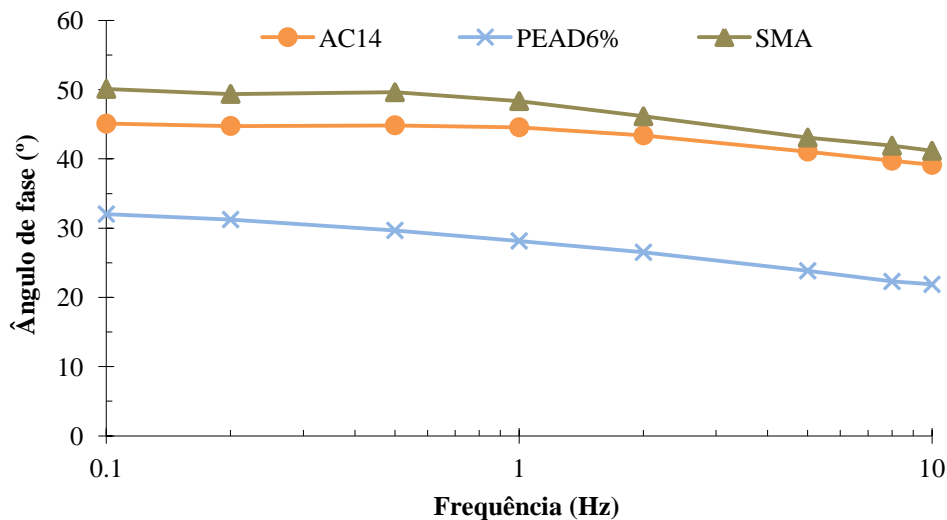


Figura 60 - Ângulo de fase das misturas betuminosas a uma temperatura de 30 °C.

Os resultados do ângulo de fase são consistentes com os indicados para o módulo de rigidez, com as misturas AC14 e SMA a manterem um comportamento semelhante entre si, sendo o comportamento da mistura PEAD6% muito menos viscoso (os módulos mais baixos correspondem, por regra, a ângulos de fase mais altos).

Finalmente, na Tabela 10 apresentam-se os módulos de rigidez e os ângulos de fase a 20 °C para as três misturas betuminosas realizadas, para a frequência de 1Hz, que representa as condições a considerar nos ensaios de avaliação da energia consumida.

Tabela 10 - Módulos de rigidez e ângulos de fase das misturas betuminosas.

Mistura betuminosa	Módulo de rigidez (MPa)	Ângulo fase (°)
AC14	1616	32,5
AC14PEAD	3291	18,3
SMA	1570	30,4

#### 4.2 Considerações gerais sobre a determinação da resistência ao rolamento com base no consumo energético

Neste subcapítulo pretende-se analisar o comportamento da curva da potência necessária para impor o movimento de vai e vem da mesa do ensaio de pista (WTT), em função do seu mecanismo que permite aplicar estes ciclos. Também serão analisadas as diferenças nos comportamentos dos consumos energéticos (com ou sem aplicação do peso, com superfícies mais irregulares e com existência de inclinações) e quais as suas causas.

Baseado no pressuposto de que o mecanismo do WTT funciona exatamente da mesma forma para qualquer tipo de material que foi ensaiado, pode verificar-se que o comportamento da curva da potência, da qual se apresenta um exemplo na Figura 61, é semelhante em todos os ensaios realizados, pois depende apenas desse mecanismo.

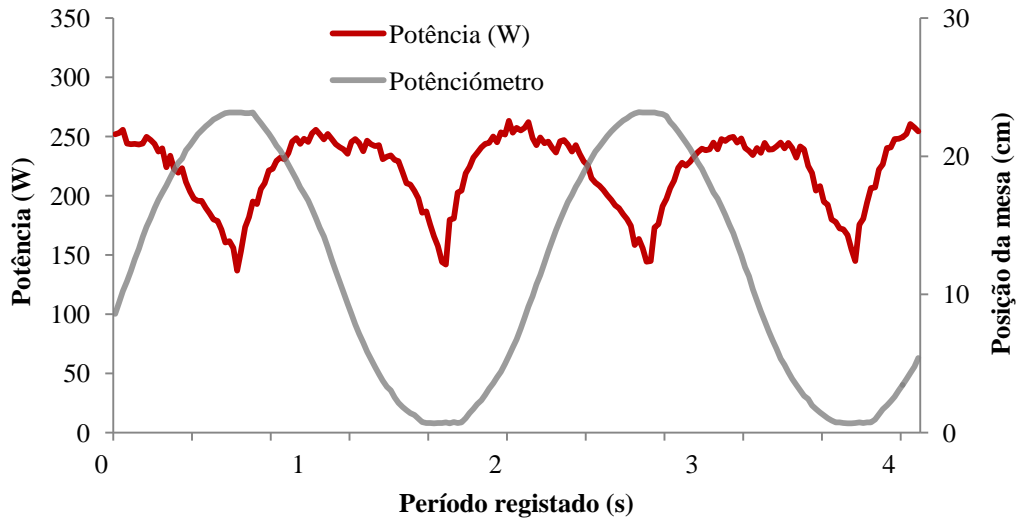


Figura 61 - Exemplo do registo dos consumos num dos ensaios realizados.

Como se pode verificar, existe uma dependência entre a curva que representa a potência e o movimento da mesa registado pelo potenciómetro. De facto, a inversão de direcção do movimento da mesa, ou seja os valores mínimos e máximos do potenciómetro, correspondem ao momento em que a potência regista os valores mínimos. Isto significa que nestes momentos o mecanismo necessita de menos energia aplicada, e isto deve-se ao facto do mecanismo existente no WTT ser um mecanismo que converte movimento rotacional em movimento linear, também conhecido como *Scotch Yoke* (Figura 62).

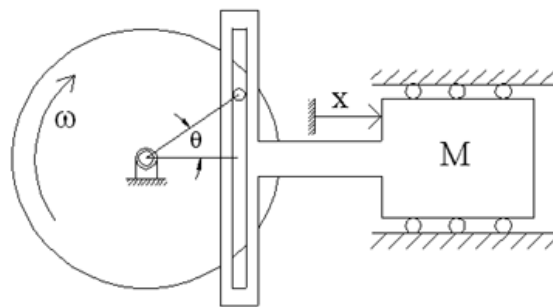


Figura 62 - Exemplo do mecanismo *Scotch Yoke* usado no equipamento deste trabalho.

O funcionamento deste mecanismo consiste na rotação de um prato que tem junto do seu limite um pistão preso a um mecanismo com liberdade para se movimentar numa direção nos dois sentidos. Este sistema faz com que a rotação do prato imponha um movimento linear à mesa do equipamento WTT. Assim sendo, note-se que no momento de inversão do sentido de movimento o pistão vai-se movimentar praticamente sem fazer força no mecanismo que se movimenta linearmente. Justifica-se então que nos momentos de inversão de sentido da mesa a potência registada seja mais baixa, resultando no seu aumento quando a mesa volta a ser forçada a se movimentar pelo pistão, e diminuindo quando se volta a aproximar do ponto de inversão. Daqui resulta o comportamento se subida e descida da potência no movimento cíclico da mesa, o que permite validar parcialmente as leituras de consumo efetuadas.

De seguida procurou avaliar-se a influência da carga adicional (18 kg) do ensaio WTT, aplicada de forma a aumentar a pressão no contacto da roda com a lajeta, na variação dos consumos medidos. Assim, na Figura 63 faz-se a comparação dos consumos entre um ensaio realizado sobre o mesmo tipo de superfície de referência (metal liso) realizado sem a aplicação da carga (sem peso) ou com a aplicação da carga (com peso).

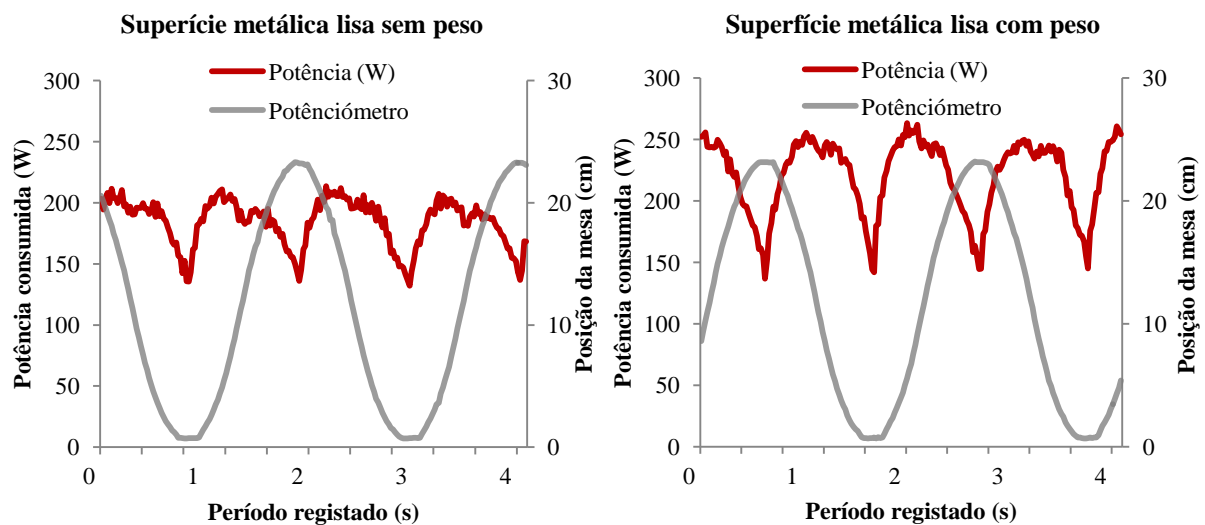


Figura 63 - Influência do aumento de carga sobre a roda no consumo medido.

Para o mesmo material ensaiado, pode-se verificar que o consumo de energia aumenta significativamente quando é colocada mais carga sobre a roda no ensaio, tal como esperado.

Ao estudar os diferentes materiais de calibração já referidos, realizou-se um ensaio sobre uma rede metálica de 17,4 mm de abertura, cujo comportamento característico no consumo da potência é ligeiramente diferente dos outros materiais, como se apresenta na Figura 64.

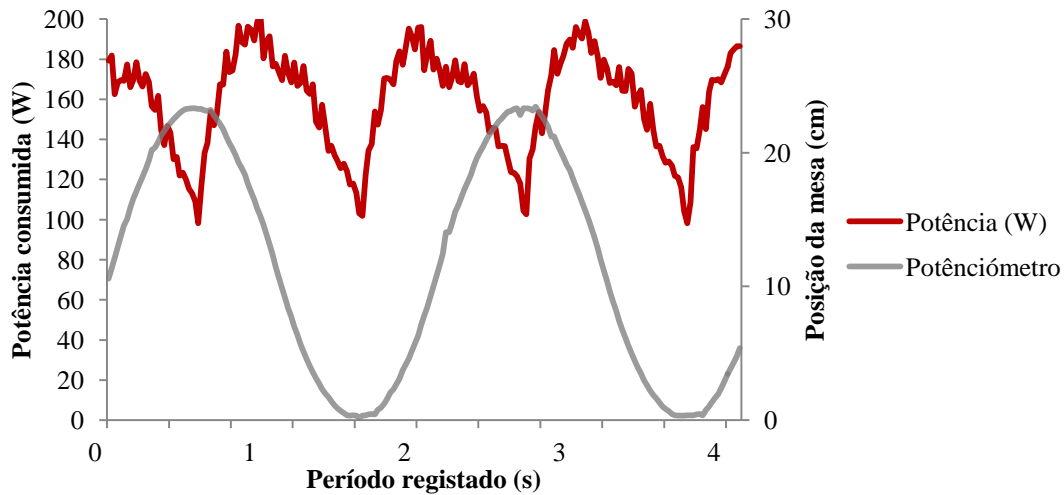


Figura 64 - Comportamento da curva de consumo de energia no ensaio com rede metálica.

Este ensaio revelou pequenos picos evidenciados aquando da deslocação mesa. Estes altos e baixos (que aparentemente seria ruído) nos consumos de energia revelam-se pelo facto de a roda ser impulsionada pelas irregularidades que caracterizam a rede. Isto provoca que os consumos associados ao contacto pneu/superfície sejam mais baixos, dado que essa impulsão impede que o contacto pneu/superfície se realize em pleno, diminuindo a resistência ao rolamento do pneu. Mais à frente também se vai verificar que a chapa-xadrez revelou um baixo consumo no contacto pneu/superfície, o que se pode dever ao mesmo fenómeno.

Outro aspeto de interesse diz respeito ao estudo de superfícies inclinadas. Assim, verifica-se que o comportamento da curva do consumo de energia é diferente nas subidas e descidas (para cada ciclo dá-se um movimento de “sobe e desce”), sendo lógico que para subir (0-1 e 2-3 s) seja necessária mais energia do que na descida (1-2 e 3-4 s) da roda (Figura 65).

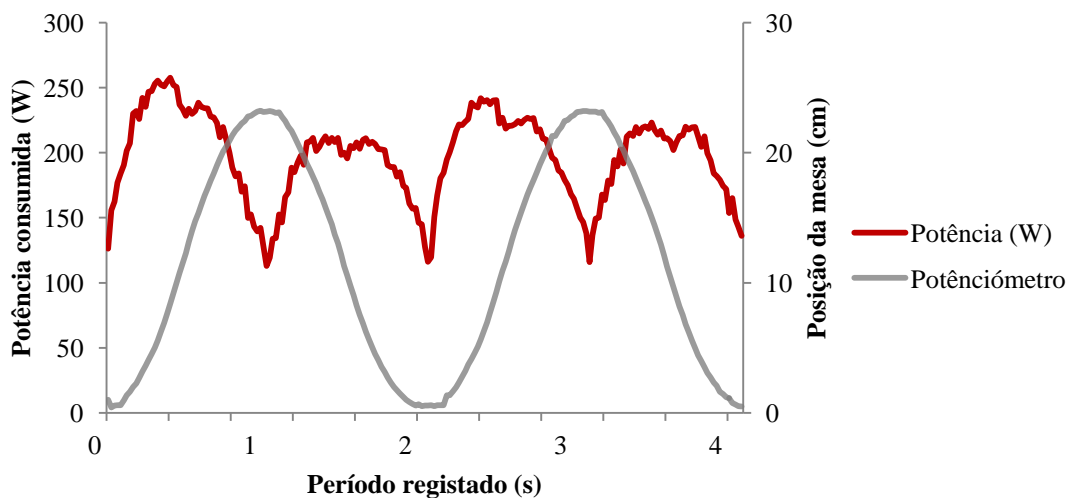


Figura 65 - Comportamento da curva de consumo energético na superfície inclinada.

De facto, verifica-se que a onda de consumo na fase ascendente da roda é maior do que na fase descendente, que se traduz numa maior necessidade de energia para a fase ascendente.

Em suma, os comportamentos evidenciados pelas curvas de consumo energético parecem originar leituras lógicas, e em concordância com o expectável para o mecanismo existente e com os parâmetros em análise, o que demonstra que a leitura dos consumos associados à resistência ao rolamento sobre cada material em estudo aparentemente é válida.

### 4.3 Análise individual da influência de alguns parâmetros nos consumos energéticos

#### 4.3.1 Módulo de rigidez

Para o estudo da variação do consumo com o módulo de rigidez analisaram-se misturas betuminosas com módulos de rigidez distintos, realizando uma comparação entre a mistura convencional AC14 e a mistura mais rígida AC14PEAD. Também foram utilizados os resultados dos ensaios de consumo da superfície metálica lisa e superfície em borracha, que também têm propriedades distintas em termos de rigidez. Procurou-se que as superfícies a comparar tivessem uma textura semelhante, o que se torna importante para que as diferenças no consumo de energia registadas se devam apenas ao parâmetro do módulo de rigidez.

Para a análise das misturas betuminosas foi realizada uma média entre os valores de cada lajeta, uma vez que foram ensaiadas duas lajetas da mesma mistura betuminosa, o que permite obter valores mais consistentes.

Na Tabela 11 apresentam-se os resultados dos consumos energéticos registados ao longo do tempo de ensaio sem a aplicação da carga de 18 kg na roda que pode ser usada no ensaio WTT. A apresentação gráfica desses resultados é feita na Figura 66.

Tabela 11 - Consumos de energia devido à resistência ao rolamento de materiais com diferente rigidez no ensaio sem aplicação de peso.

Material	Consumo (J/s)				
	2 min	10 min	20 min	30 min	40 min
Borracha	50,2	53,2	47,2	45,3	40,1
Metálico liso	49,8	46,6	43,7	40,8	39,5
AC14	28,2	23,2	22,1	20,7	19,3
AC14PEAD	26,0	23,6	22,7	20,8	20,1

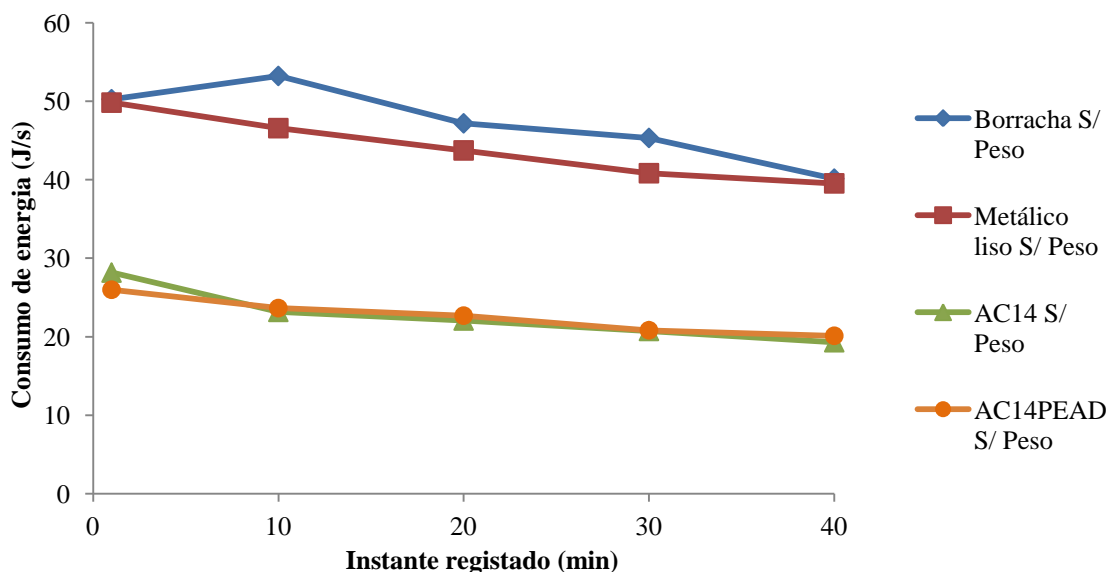


Figura 66 - Consumos de energia devido à resistência ao rolamento de materiais com diferente rigidez no ensaio sem aplicação de peso.

Verifica-se que ao longo do ensaio existe uma tendência para os consumos baixarem gradualmente em todos os materiais. Isto pode-se dever ao aquecimento que o pneu e a superfície vão adquirindo com o sucessivo rolamento do pneu, ou também ao aquecimento do próprio mecanismo, que torna mais fácil o movimento (reduzindo assim o consumo).

A superfície de borracha demonstra um comportamento particular na evolução do consumo de energia. Verifica-se que numa fase inicial a necessidade de energia aumenta, decrescendo após 10 minutos (tal como os restantes materiais).

A borracha tem uma suscetibilidade à temperatura que faz com que as suas propriedades se alterem, tendo um comportamento mais viscoso. Como a temperatura sobe devido ao contacto da roda com a superfície em estudo, nos primeiros minutos a borracha vai ter um comportamento mais viscoso, o que pode causar uma maior resistência ao rolamento do pneu pela deformação da superfície de contacto, provocando a necessidade de um maior consumo. No entanto, uma vez que estamos perante uma fina camada de borracha (1 mm), as repetidas passagens do pneu fizeram com que a camada se deformasse ao ponto de se tornar numa superfície mais fina e com uma rigidez próxima daquela que caracteriza o material em que a borracha está apoiada, que neste caso era uma viga metálica em alumínio (Figura 67). Isso também terá levado a que o consumo continuasse a descer de forma evidente até que, nos últimos minutos do ensaio, se tenha atingido um consumo semelhante ao da viga metálica onde a borracha estava apoiada.



Figura 67 - Deformação da borracha imposta pelas repetidas passagens da roda.

Os resultados registados indicam que o módulo de rigidez dos materiais não aparentam ter uma grande influência nos consumos de energia analisados pelo método em causa. De facto, os resultados que representam as duas misturas betuminosas são muito próximos, quando os seus módulos são significativamente distintos, tal como já foi referido anteriormente. A superfície metálica lisa apresenta resultados que estão acima do esperado, uma vez que como é mais rígida deveria ter o menor consumo, o que sugere que existem outros parâmetros que influenciam mais o consumo de energia, e não o módulo de rigidez.

Na Figura 68 pode-se observar os valores médios dos consumos durante todo o ensaio, para os diferentes materiais estudados, que confirmam uma proximidade entre as misturas AC14 e AC14PEAD, bem como entre a superfície metálica lisa e a borracha.

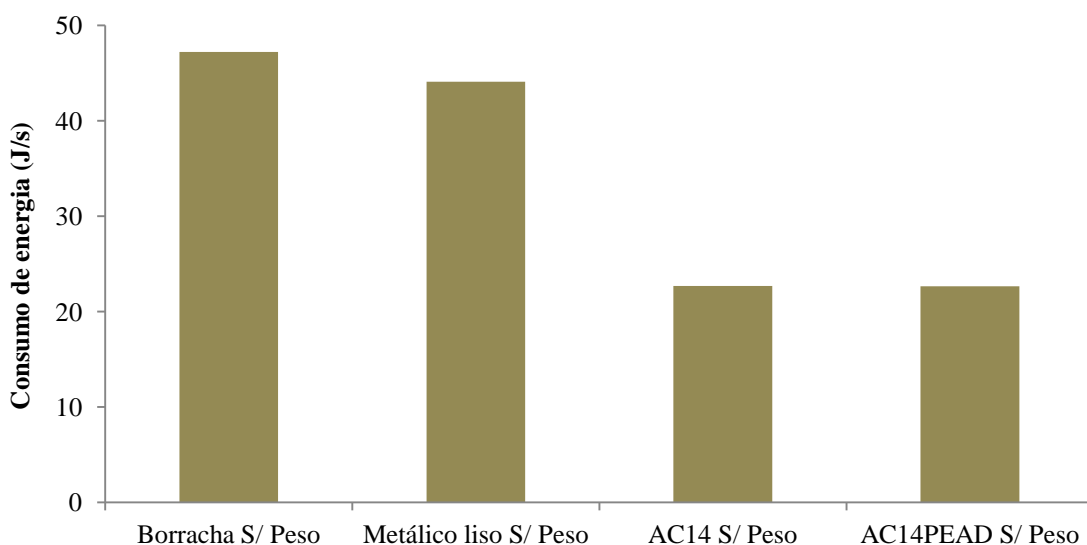


Figura 68 - Comparação do consumo médio devido à resistência ao rolamento de materiais com diferente rigidez no ensaio sem aplicação de peso.

Para complementar a análise da resistência ao rolamento para materiais com diferente rigidez, no caso do ensaio sem peso adicional, a Tabela 12 demonstra a relação dos consumos de energia tendo como referência a superfície metálica lisa.

Tabela 12 - Relação entre os consumos (resistência ao rolamento) dos materiais com diferente rigidez no ensaio sem aplicação de peso.

Material ensaiado	Variação do consumo (%)
Metálico liso (Referência)	0,0
AC14	-48,6
AC14PEAD	-48,6
Borracha	+7,1

Na Tabela 13 apresentam-se os resultados dos consumos energéticos registados ao longo do tempo de ensaio, agora com a aplicação da carga de 18 kg na roda usada no ensaio WTT. A apresentação gráfica desses resultados é feita na Figura 69.

Tabela 13 - Consumos de energia devido à resistência ao rolamento de materiais com diferente rigidez no ensaio com aplicação de peso.

Material	Consumo (J/s)				
	2 min	10 min	20 min	30 min	40 min
Borracha	93,2	90,5	88,3	86,1	87,1
Metálico liso	86,0	83,0	82,6	89,1	88,4
AC14	71,6	73,0	69,2	68,1	68,0
AC14PEAD	69,0	69,6	69,2	68,0	66,3

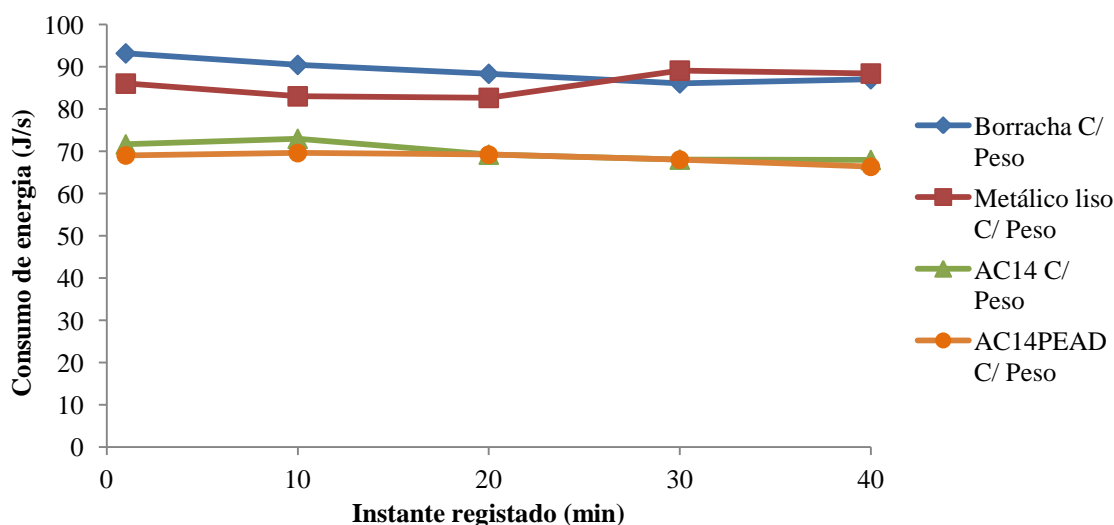


Figura 69 - Consumos de energia devido à resistência ao rolamento de materiais com diferente rigidez no ensaio com aplicação de peso.



Quando foi aplicado o peso de 18 kg no ensaio de resistência ao rolamento o comportamento na evolução dos consumos foi idêntico ao verificado anteriormente sem peso, não se identificando nenhuma alteração significativa na comparação entre os consumos de materiais com diferente rigidez. No entanto, e tal como seria de esperar, os consumos apresentam uma subida em relação aos ensaios sem o peso para todos os materiais em estudo. Em relação às misturas betuminosas, o aumento de carga parece ter um efeito que permite realçar um pouco mais o efeito do módulo de rigidez, uma vez que neste ensaio já é possível verificar um menor consumo, ainda que ligeiro, no que diz respeito à laje mais rígida (AC14PEAD) em relação à laje com a mistura AC14. O consumo na superfície metálica lisa também foi um pouco inferior ao observado na superfície de borracha, pela primeira ser mais rígida.

Os consumos nos últimos minutos dos ensaios com a borracha e com a superfície metálica lisa parecem muito próximos, o que confirma o efeito já referido anteriormente quando a borracha já tem uma camada muito fina por se encontrar demasiado deformada (Figura 67), sendo que a rigidez que interfere no consumo traduz-se mais na rigidez da superfície metálica.

Na Figura 70 pode-se observar os valores médios dos consumos durante todo o ensaio com peso adicional, para os diferentes materiais estudados, que voltam a confirmar a proximidade entre as misturas AC14 e AC14PEAD, bem como entre a superfície metálica lisa e a borracha.

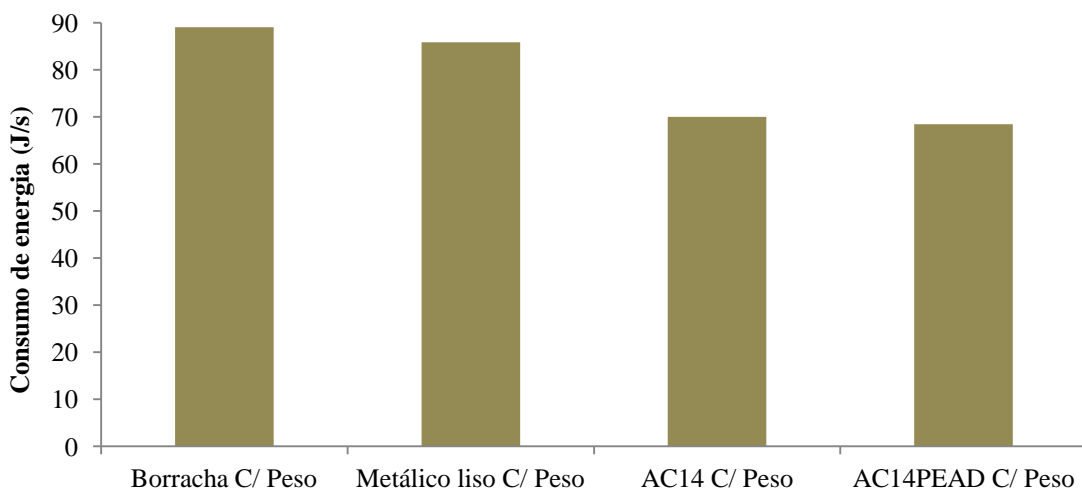


Figura 70 - Comparação do consumo médio devido à resistência ao rolamento de materiais com diferente rigidez no ensaio com aplicação de peso.

Para complementar a análise da resistência ao rolamento para materiais com diferente rigidez, no caso do ensaio com peso adicional, a Tabela 14 demonstra a relação dos consumos de energia tendo como referência a superfície metálica lisa. Verifica-se que as diferenças nos consumos entre os vários materiais são inferiores ao utilizar mais carga sobre a roda.

Tabela 14 - Relação entre os consumos (resistência ao rolamento) dos materiais com diferente rigidez no ensaio com aplicação de peso.

Material ensaiado	Variação do consumo (%)
Metálico liso (Referência)	0,0
AC14	-18,5
AC14PEAD	-20,3
Borracha	+3,7

#### 4.3.2 Rugosidade e atrito

Para o estudo da variação do consumo com a rugosidade/atrito analisaram-se misturas com características superficiais distintas, realizando uma comparação entre a mistura convencional AC14 e a mistura mais rugosa do tipo SMA. Também se utilizaram os resultados dos ensaios de consumo da superfície metálica lisa, da chapa xadrez e da rede metálica, que também têm propriedades distintas em termos de características superficiais. Procurou-se que os materiais a comparar tivessem um módulo semelhante, o que se torna importante para que as diferenças no consumo de energia registadas se devam apenas às características superficiais.

Assim, na Tabela 15 apresentam-se os resultados dos consumos energéticos registados ao longo do tempo de ensaio, nas superfícies com diferentes texturas, e sem a aplicação da carga de 18 kg do ensaio WTT. A apresentação gráfica desses resultados é feita na Figura 71.

Tabela 15 - Consumos de energia devido à resistência ao rolamento de materiais com diferentes características superficiais no ensaio sem aplicação de peso.

Material	Consumo (J/s)				
	2 min	10 min	20 min	30 min	40 min
Chapa xadrez	14,2	10,4	5,3	6,2	4,3
Metálico liso	49,8	46,6	43,7	40,8	39,5
AC14	28,2	23,2	22,1	20,7	19,3
SMA	19,7	18,1	18,1	17,6	17,5
Rede Metálica	9,5	8,4	8,5	9,1	9,1

Ao analisar os resultados para superfícies de grande rugosidade verificou-se que foram obtidos consumos baixos, inferiores até aos das misturas betuminosas e da superfície metálica lisa. Este facto evidencia que o fator que mais influência tem nos consumos energéticos, pelo método utilizado neste trabalho, está relacionado com os pontos de contacto existentes entre o pneu do equipamento e a superfície em análise.

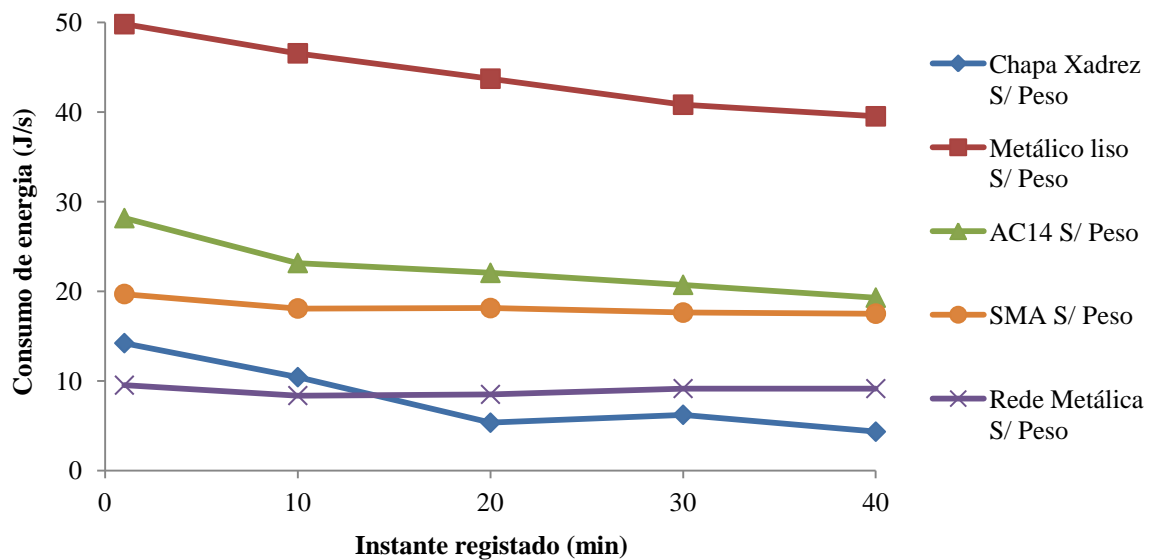


Figura 71 - Consumos de energia devido à resistência ao rolamento de materiais com diferentes características superficiais no ensaio sem aplicação de peso.

Com base neste pressuposto, as superfícies mais rugosas apresentaram consumos mais baixos (ao contrário do que seria esperado), pois a área do pneu que interage com a superfície é menor, facilitando o movimento em consequência dum atrito mais reduzido. Deve-se ter em consideração que o pneu utilizado no ensaio tem características diferentes de um pneu real, verificando-se que o pneu utilizado no ensaio não penetra nas irregularidades das superfícies rugosas por ser muito rígido. Este facto deve ter condicionado o efeito que era esperado no consumo por parte da rugosidade dos materiais ensaiados.

Em relação às misturas betuminosas verifica-se que a mistura SMA é mais rugosa, e desse modo apresenta um consumo ligeiramente mais baixo em comparação com a mistura betuminosas AC14, o que comprova o facto de os consumos serem mais baixo nas superfícies mais rugosas e, por isso, de menor área de contacto com o pneu deste ensaio.

Na Figura 72 pode-se observar os valores médios dos consumos durante todo o ensaio sem peso adicional, para os diferentes materiais estudados, que confirmam os consumos mais baixos representados pelas superfícies de maior rugosidade (rede metálica e chapa xadrez).

Para complementar a análise da resistência ao rolamento para materiais com diferente rugosidade, no caso do ensaio sem peso adicional, a Tabela 16 demonstra a relação dos consumos de energia tendo como referência a superfície metálica lisa. As diferenças nos consumos entre os vários materiais são muito superiores às verificadas durante o estudo do efeito da rigidez. Nota-se ainda a redução do consumo quando o material é mais rugoso.

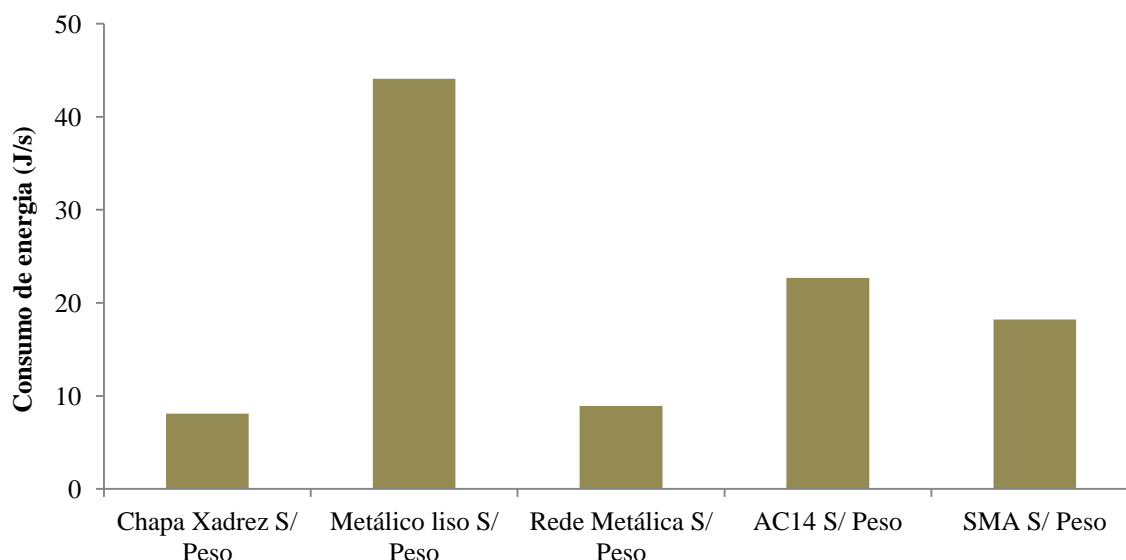


Figura 72 - Comparação do consumo médio devido à resistência ao rolamento de materiais com diferentes características superficiais no ensaio sem aplicação de peso.

Tabela 16 - Relação entre os consumos (resistência ao rolamento) dos materiais com diferentes características superficiais no ensaio sem aplicação de peso.

Material ensaiado	Variação do consumo (%)
Metálico liso (Referência)	0,0
AC14	-48,6
SMA	-58,7
Chapa xadrez	-81,6
Rede metálica	-79,8

Na Tabela 17 apresentam-se os resultados dos consumos energéticos de misturas betuminosas com diferentes rugosidades, registados durante o ensaio com o equipamento WTT, mas agora com a aplicação da carga de 18 kg na roda. A apresentação gráfica desses resultados é feita na Figura 73.

Tabela 17 - Consumos de energia devido à resistência ao rolamento de materiais com diferentes características superficiais no ensaio com aplicação de peso.

Material	Consumo (J/s)				
	2 min	10 min	20 min	30 min	40 min
Chapa Xadrez	57,9	52,0	56,0	50,9	52,9
Metálico liso	86,0	83,0	82,6	89,1	88,4
AC14	71,6	73,0	69,2	68,1	68,0
SMA	67,1	63,6	65,4	62,4	63,9
Rede Metálica	57,0	57,8	55,0	54,1	54,7

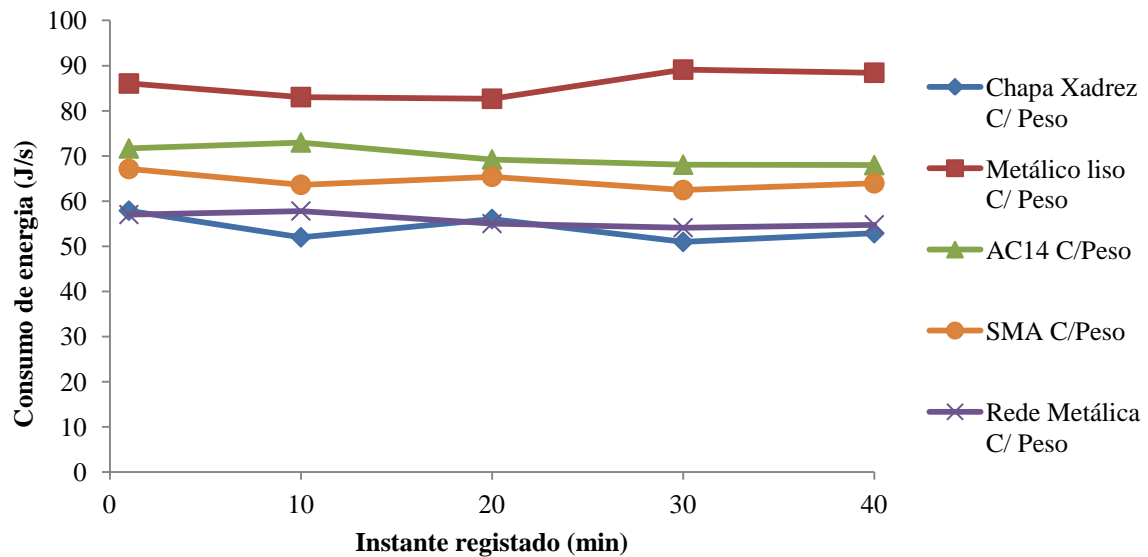


Figura 73 - Consumos de energia devido à resistência ao rolamento de materiais com diferentes características superficiais no ensaio com aplicação de peso.

Quando foi aplicada a carga de 18 kg no ensaio de resistência ao rolamento, verificou-se que a hierarquização dos consumos em função da rugosidade do material é semelhante ao ensaio sem a carga, embora, tal como seria de esperar, os consumos tenham aumentado em relação aos ensaios sem o peso para todos os materiais em estudo. No entanto, verifica-se que os resultados correspondentes à rede metálica e à chapa xadrez encontram-se mais próximos dos medidos para as misturas betuminosa e para a superfície lisa metálica, o que resulta da carga imposta ter aumentado os pontos de contacto entre a roda e a superfície em estudo, fazendo aumentar de forma mais significativa o consumo de energia para os materiais mais rugosos.

Na Figura 74 pode-se observar os valores médios dos consumos durante todo o ensaio com peso adicional, para os vários materiais estudados, que confirmam a existência de consumos mais próximos no rolamento sobre materiais com diferentes características superficiais.

Para finalizar a análise da resistência ao rolamento para materiais com diferente rugosidade, no caso do ensaio sem peso adicional, a Tabela 18 demonstra a relação dos consumos de energia tendo a superfície metálica lisa como referência. As diferenças nos consumos entre os vários materiais continuam a ser superiores às verificadas no estudo do efeito da rigidez, mas são muito inferiores às medidas para estes materiais (com diferente rugosidade) no ensaio sem peso, pelas razões já referidas. No entanto, continua a verificar-se a redução do consumo quando o material é mais rugoso.

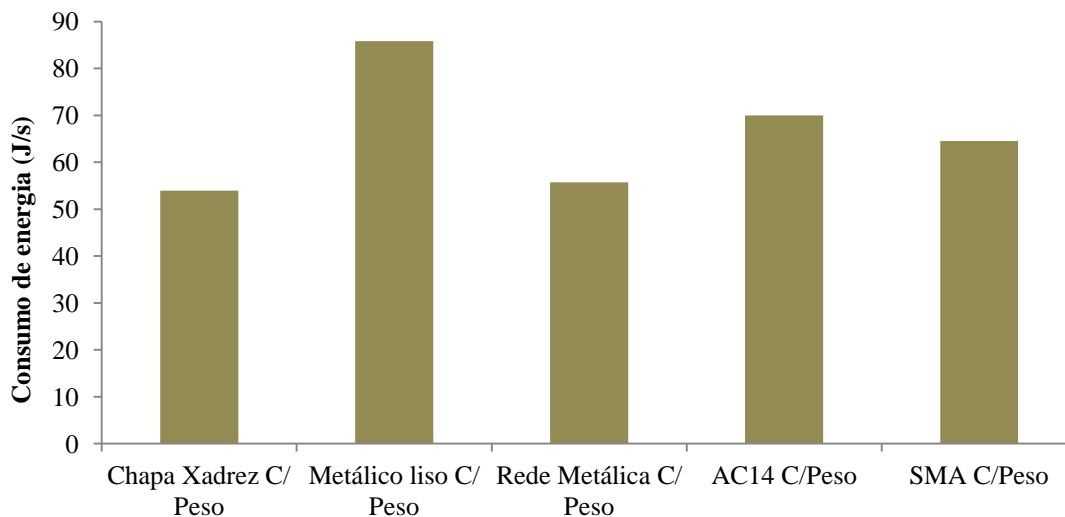


Figura 74 - Comparação do consumo médio devido à resistência ao rolamento de materiais com diferentes características superficiais no ensaio com aplicação de peso.

Tabela 18 - Relação entre os consumos (resistência ao rolamento) dos materiais com diferentes características superficiais no ensaio com aplicação de peso.

Material ensaiado	Varição do consumo (%)
Metálico liso (Referência)	0,0
AC14	-18,5
SMA	-24,9
Chapa xadrez	-37,2
Rede metálica	-35,1

#### 4.4 Análise da influência do aumento da temperatura nos consumos energéticos

Nas Tabelas 19 a 21 pode verificar-se a evolução da temperatura no exterior e interior da laje ensaiada, bem como a deformação que ocorreu, respetivamente nas lajes AC14, AC14PEAD e SMA, no decorrer do ensaio para avaliação do efeito da temperatura no consumo energético.

Tabela 19 - Evolução da deformação e temperatura no decorrer do ensaio de resistência ao rolamento com aquecimento da mistura AC14.

Instante (min)	Temp. exterior (°C)	Temp. laje (°C)	Deformação (mm)
2	26,5	24,6	0,00
10	29,0	25,6	0,04
20	33,5	26,5	0,14
30	36,0	27,5	0,22
40	37,0	29,1	0,34
50	37,0	30,6	0,47

Tabela 20 - Evolução da deformação e temperatura no decorrer do ensaio de resistência ao rolamento com aquecimento da mistura AC14PEAD.

Instante (min)	Temp. exterior (°C)	Temp. laje (°C)	Deformação (mm)
2	42,5	27,9	0,00
10	42,5	29,2	0,02
20	42,0	30,8	0,09
30	41,5	32,4	0,16
40	41,0	33,7	0,20
50	40,0	34,8	0,25

Tabela 21 - Evolução da deformação e temperatura no decorrer do ensaio de resistência ao rolamento com aquecimento da mistura SMA.

Instante (min)	Temp. exterior (°C)	Temp. laje (°C)	Deformação (mm)
2	32,6	25,2	0,00
10	43,0	29,9	0,03
20	41,0	30,6	0,08
30	40,5	32,0	0,14
40	40,5	33,3	0,31
50	40,0	34,4	0,50

Os resultados de deformação demonstram não haver alterações significativas na profundidade de rodeira, dado que o ensaio foi realizado a temperaturas relativamente baixas e com uma duração insuficiente para a ocorrência desse fenómeno. Este facto ajuda a compreender a razão pela qual não houve alteração da textura no decorrer do ensaio de resistência ao rolamento sob aquecimento, como comprovam os resultados de mancha de areia (Secção 4.5).

Na Tabela 22 apresentam-se os resultados dos consumos energéticos devido à resistência ao rolamento registados nestes ensaios com aumento de temperatura ao longo do tempo. Os mesmos resultados são apresentados graficamente nas Figuras 75 a 77, respetivamente para as lajes com as misturas betuminosas AC14, AC14PEAD e SMA.

Tabela 22 - Consumos de energia por resistência ao rolamento no ensaio com aquecimento.

Misturas	Consumo (J/s)					
	2 min	10 min	20 min	30 min	40 min	50 min
AC14	69,6	68,5	69,5	71,0	72,5	73,2
AC14PEAD	74,8	75,7	74,1	73,1	74,1	72,8
SMA	73,9	76,5	77,6	75,9	75,0	75,8

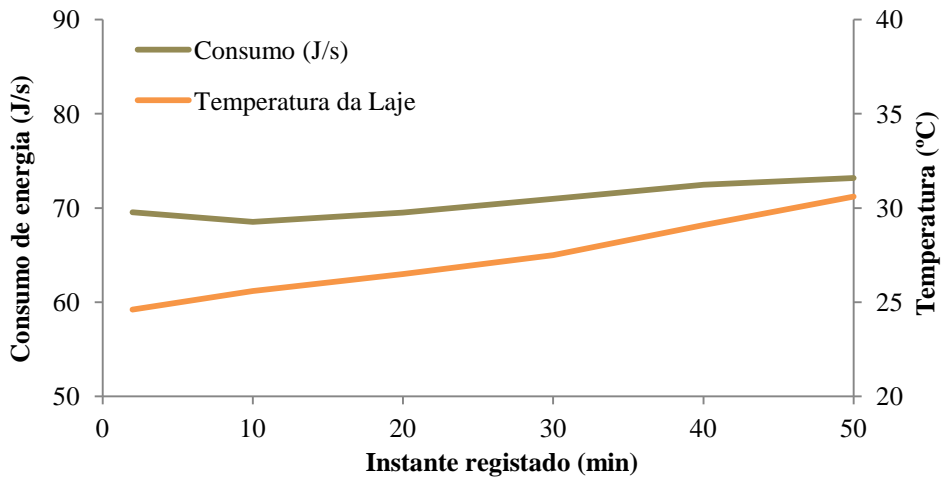


Figura 75 - Evolução do consumo energético por resistência ao rolamento em função da temperatura na mistura AC14.

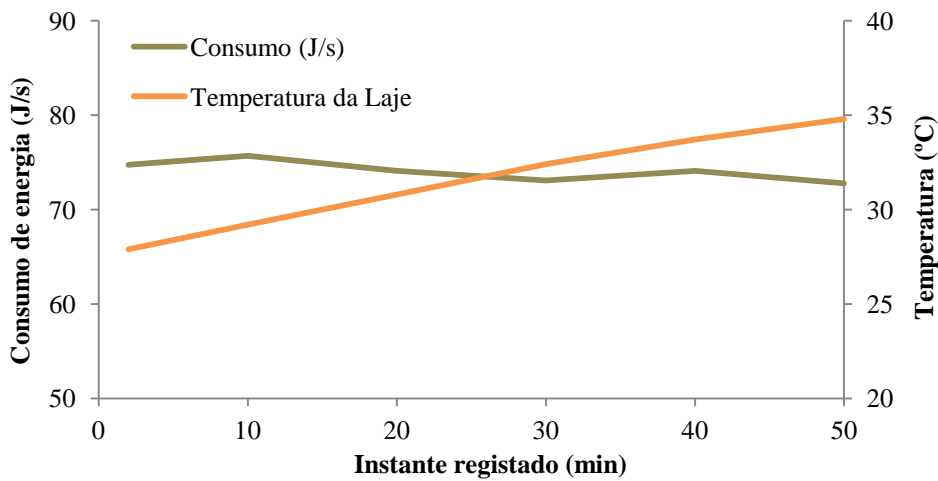


Figura 76 - Evolução do consumo energético por resistência ao rolamento em função da temperatura na mistura AC14PEAD.

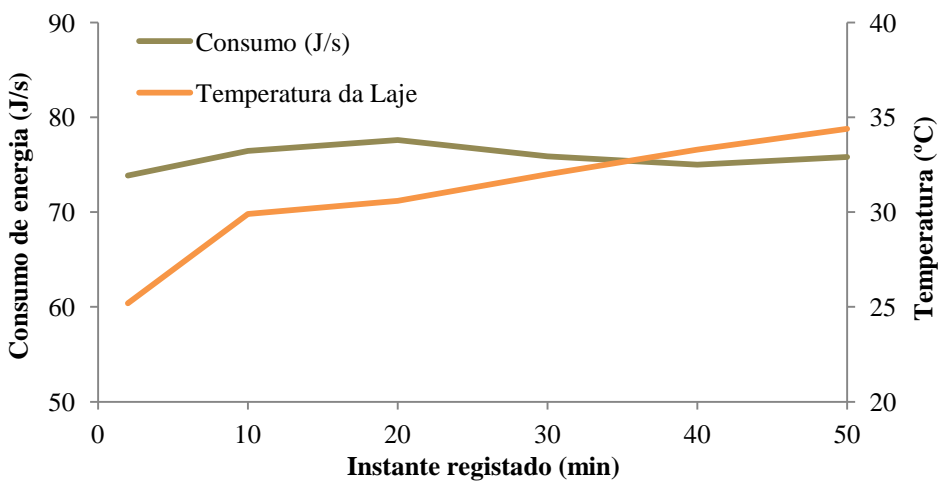


Figura 77 - Evolução do consumo energético por resistência ao rolamento em função da temperatura na mistura SMA.



Para a laje com a mistura AC14 verifica-se apenas um ligeiro aumento do consumo de energia com o aumento de temperatura da laje. Isto deve-se ao comportamento viscoelástico da laje que reduz um pouco o seu módulo de rigidez para temperaturas mais altas, o que implica um aumento nos consumos de energia no ensaio de resistência ao rolamento.

No caso da laje com a mistura AC14PEAD pode-se verificar que quando a temperatura da laje sobe o consumo é aproximadamente constante. Isto é justificado pela modificação do betume com o polímero PEAD utilizado nesta mistura betuminosa. Este polímero é um plastómetro com um comportamento que diminui a suscetibilidade da laje ao aumento da temperatura, razão pela qual o consumo é aproximadamente constante.

Para a laje com a mistura SMA verificou-se um comportamento análogo ao da laje com a mistura AC14, uma vez que também se verifica um aumento do consumo de energia quando a temperatura da laje aumenta (pelas razões atrás referidas).

Para complementar o estudo da variação do consumo por resistência ao rolamento a diferentes temperaturas, na Figura 78 apresenta-se uma comparação dos consumos de energia no ensaio WTT, para as três misturas estudadas, antes e após aquecimento.

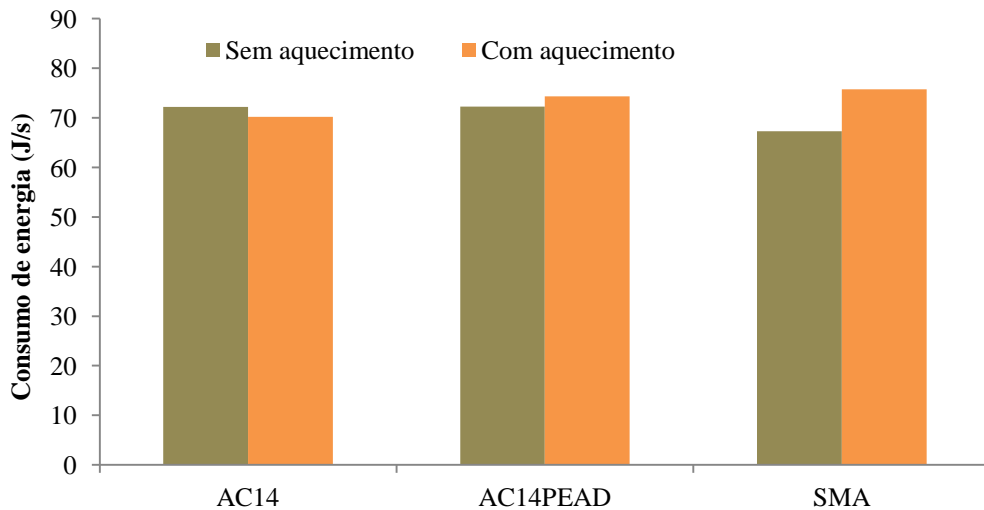


Figura 78 - Energia consumida por resistência ao rolamento com e sem aquecimento.

Não foi totalmente claro que em termos médios o aquecimento das lajes provocasse um aumento de consumo de energia, à exceção da laje com a mistura SMA (que tem uma maior percentagem de betume). De facto, os resultados mostram uma grande proximidade nos consumos de energia para os ensaios WTT realizados com ou sem aquecimento, sendo que no caso da mistura AC14 até se verificou uma redução do consumo médio.

#### 4.5 Análise geral dos ensaios de resistência ao rolamento

Na Figura 79 apresenta-se graficamente o consumo de energia de todos os materiais estudados devido à resistência ao rolamento, que resulta da diferença entre o consumo total e o consumo básico do equipamento em cada ensaio realizado. Os resultados apresentados foram obtidos em duas condições diferentes, com e sem o peso de 18 kg do ensaio WTT.

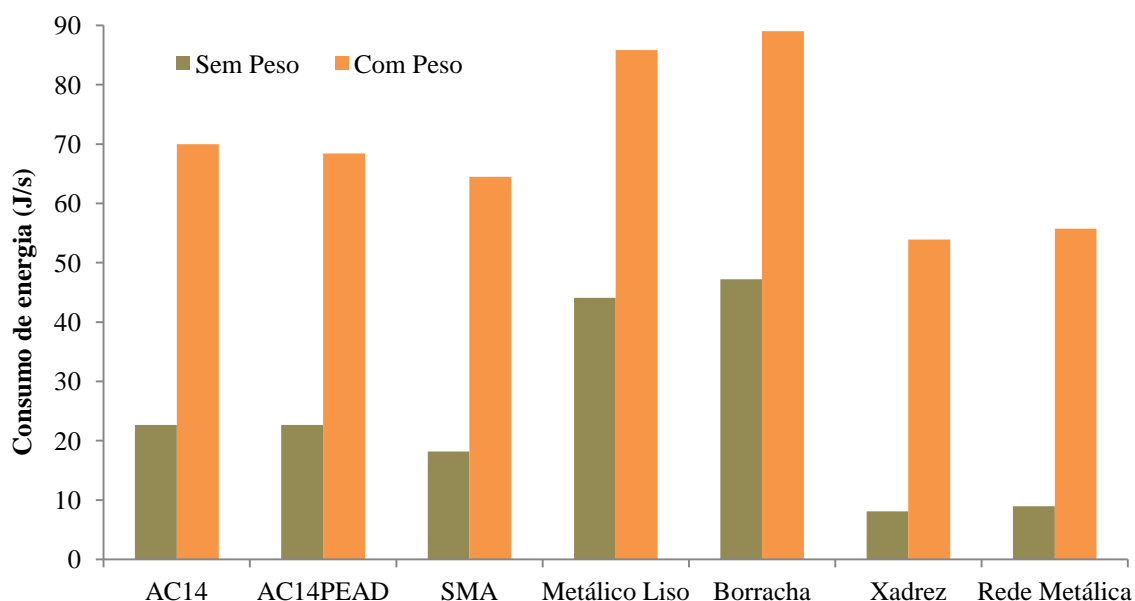


Figura 79 - Resultados do ensaio de resistência ao rolamento de todos os materiais.

Ao realizar esta análise geral de todos os ensaios, verifica-se claramente que o acréscimo do peso de 18 kg representa um aumento no consumo de energia considerável em todos os ensaios realizados. Também é possível confirmar que as superfícies de maior rugosidade têm tendencialmente consumos mais baixos (rede metálica e chapa-xadrez), e as superfícies lisas (metálico liso e borracha) consumos mais altos, estando os consumos das misturas betuminosas entre estes valores. Pode-se ainda verificar que a aplicação do peso de 18 kg não altera a hierarquização dos materiais estudados, mas as superfícies com maior rugosidade passam a ter consumos mais próximos das superfícies lisas.

Fazendo uma análise comparativa entre as três misturas betuminosas ensaiadas, verifica-se que a mistura SMA revelou o consumo mais baixo em ambos os ensaios realizados (com ou sem peso). Os consumos das misturas AC14 e AC14PEAD são inferiores aos da mistura SMA, sendo relativamente próximos entre si.

Em termos quantitativos verifica-se que o contacto pneu/pavimento origina um acréscimo no consumo de energia entre 10 e 90 J/s, que se traduz num consumo médio de 50 J/s. Quando se

aplica o peso adicional de 18 kg o consumo aumenta 40 a 50 J/s em comparação com o consumo sem aplicação do peso (10 a 50 J/s, com o valor médio de 25 J/s).

#### 4.6 Alterações na textura no ensaio de resistência ao rolamento

Como foi referido no Capítulo 3, perante uma necessidade de registar alterações de textura no decorrer dos ensaios de medição de consumo, desenvolveu-se um método de determinação da profundidade média da textura na zona de passagem da roda do equipamento WTT onde se realizaram os ensaios de resistência ao rolamento. Este método foi designado por método da textura localizada, e os resultados obtidos antes e após o ensaio WTT (referentes a cada lajeta ensaiada) são apresentados na Tabela 23, e são ilustrados graficamente na Figura 80.

Tabela 23 - Resultados da altura média de areia das várias misturas e lajes.

Mistura/Laje	Altura média de areia (mm)		
	Antes do ensaio	Após o ensaio	Ensaio convencional
AC14-1	0,43	0,48	0,87
AC14-2	0,47	0,59	0,87
PEAD-1	0,36	0,38	0,70
PEAD-2	0,41	0,37	0,70
SMA-1	0,60	0,62	0,95
SMA-2	0,57	0,62	0,95

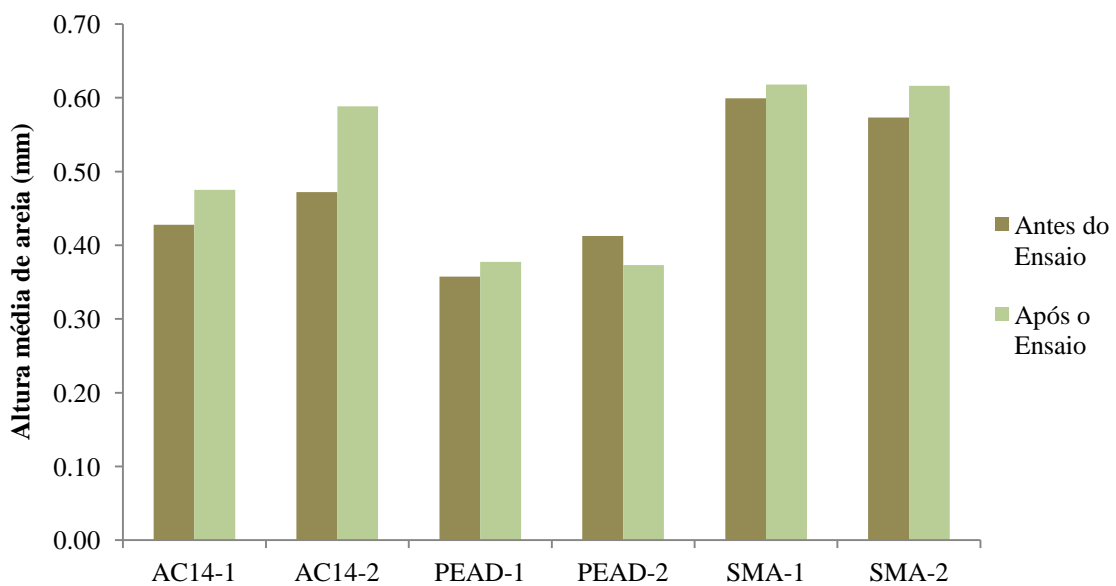


Figura 80 - Resultados da profundidade média da textura obtidos pelo método de determinação da textura localizada.

Pelos resultados obtidos pode-se verificar que não se registaram alterações significativas na textura das várias misturas após realização do ensaio de resistência ao rolamento. De facto, os resultados da textura antes e após o ensaio no WTT são muito próximos, e tendo em conta os desvios resultantes da aplicação e adaptação deste método, pode considerar-se que a textura não sofreu praticamente alterações. O facto de o ensaio de resistência ao rolamento não ter sido realizado a temperaturas elevadas, e ao mesmo tempo ter tido uma duração relativamente curta, acabou por se traduzir numa alteração da textura praticamente nula (verificando-se até um aumento da textura na maioria dos casos quando isso não seria de esperar).

Ainda na Tabela 23 podem verificar-se os resultados iniciais para o método da mancha de areia pela norma convencional. Verifica-se que existem diferenças desse método normalizado em comparação com o método da textura localizada. Estas podem dever-se à direção de compactação da mistura betuminosa (como a textura pode variar nas diferentes direções, o método convencional de mancha de areia, sendo circular, é representativo de todas as direções possíveis na laje, enquanto o método localizado foi realizado numa direção preferencial em todas as lajes). Outra possibilidade para justificar as diferenças encontradas diz respeito ao erro associado ao método de espalhamento das esferas de vidro e à medição da mancha resultante, que pode variar em função do operador. Salienta-se que os erros anteriores associados ao método localizado são em princípio superiores, pelo facto de se usar menores quantidades de vidro e de haver mais dificuldade em avaliar a área resultante do espalhamento das esferas. Contudo, as diferenças encontradas entre o método normalizado e localizado são semelhantes em todas as lajes, podendo verificar-se uma correlação entre os resultados de textura dos dois métodos, o que permite a comparação entre as lajes ao usar o método proposto neste trabalho.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 5.1 Conclusões

Este estudo teve como objetivo o desenvolvimento de um método laboratorial que permitisse, de uma forma relativamente simples, analisar a influência que os parâmetros associados às misturas betuminosas (rigidez e textura) têm no consumo energético de um veículo.

Foram definidas três misturas betuminosas, de modo a que estas obtivessem características bem diferenciadas ao nível da rigidez e da rugosidade, de modo a serem comparadas em relação aos consumos resultantes através de ensaios de resistência ao rolamento efetuados em laboratório.

Os módulos da mistura betuminosa convencional e da mistura com ligante modificado com PEAD diferenciaram-se consideravelmente, tal como esperado. No entanto, a sua textura não foi tão próxima quanto desejável, uma vez que era importante para que as diferenças nos consumos de energia destas misturas resultassem apenas do módulo de rigidez.

A mistura betuminosa SMA foi produzida com o intuito de obter uma mistura betuminosa com uma superfície de maior rugosidade em relação às outras duas misturas, prevendo-se uma profundidade média da textura mais elevada e que fosse claramente diferenciada da mistura convencional (com a qual foi comparada), o que foi parcialmente conseguido.

Particularmente no ensaio de resistência ao rolamento realizado com uma superfície de calibração em borracha, concluiu-se que a membrana de apenas 1 mm traduziu-se num consumo energético próximo do medido com a superfície metálica lisa, o que indica que a espessura de borracha era muito reduzida para demonstrar o seu efeito nos resultados.

Em relação ao ensaio localizado de determinação da profundidade média da textura, concluiu-se que este método reduz a precisão dos resultados. No entanto, o método mostrou-se relativamente consistente na comparação entre as lajes, indicando diferenças proporcionais aos resultados obtidos pelo método normalizado do ensaio de mancha de areia.

Verificou-se que existe uma relação entre os resultados *Pendulum Test Value*, que estão associados ao atrito na superfície das misturas betuminosas, e os resultados da profundidade média da textura obtidos pelo ensaio de mancha de areia, tal como seria de esperar.

No ensaio de resistência ao rolamento sujeito a aumento de temperatura verificou-se que o tempo de ensaio e o número de passagens da roda não foram suficientes para causar deformações significativas na superfície do provete. Deste modo, a deformação que ocorre devido ao tráfego rodoviário foi uma variável que se excluiu do estudo da influência que pudesse ter nos consumos de energia.

Concluiu-se que o consumo de energia no ensaio de resistência ao rolamento desenvolvido neste trabalho divide-se essencialmente em duas parcelas, uma relacionada com o peso aplicado na própria mesa, e outra devido ao contacto que a superfície ensaiada tem com o pneu (tendo a rigidez da mistura uma influência muito menor). É importante ter em conta que o consumo de energia associado ao movimento da mesa, que é dependente do peso aplicado à mesma (consumo básico), tem uma contribuição significativa no consumo total do equipamento. Logo, a determinação do consumo básico é imprescindível para se perceber quanta energia consumida está associada apenas ao contacto do pneu com a superfície.

O consumo de energia varia ao longo do tempo, em função do movimento da mesa no ciclo do equipamento do ensaio de pista (WTT), obtendo situações de consumo máximo e mínimo. O consumo é mínimo no momento em que a mesa inverte o sentido, e é máximo no ponto médio entre as inversões de sentido da mesa.

Na análise dos consumos de energia resultantes da resistência ao rolamento sem peso adicional, verificou-se que a variação do módulo de rigidez das misturas betuminosas não influenciou os resultados dos consumos, embora no ensaio com o peso a mistura betuminosa AC14PEAD (mais rígida) tenha revelado consumos ligeiramente mais baixos do que as restantes, o que significa que a carga aplicada pode ajudar a evidenciar o efeito da rigidez.

Ainda em relação aos resultados obtidos nos ensaios de resistência ao rolamento, verificou-se que superfícies de maior rugosidade revelaram consumos energéticos mais baixos que as superfícies lisas. Conclui-se que este resultado se deve à influência causada pela área de contacto na interação da roda com o provete, que conduz a mais consumo de energia quanto maior for a área de contacto (que é superior nos materiais lisos devido à rigidez elevada da roda), causando dificuldades para analisar a influência da rugosidade inicialmente prevista.

Por último, salienta-se que foram sentidas algumas dificuldades na realização do estudo, o que era expectável uma vez que foi estudada uma área de investigação inovadora, onde o objetivo era criar um novo método laboratorial para avaliação dos consumos associados à resistência

ao rolamento que se revelasse num ponto de partida para a sua evolução. Assim, o método estudado encontra-se naturalmente sujeito a melhorias e aperfeiçoamentos, embora os resultados obtidos neste trabalho tenham sido bastante consistentes durante as várias fases do estudo (independentemente de estarem ou não em conformidade com outros resultados observados antes e indicado no estado da arte – o que pode ter resultado, por exemplo, das diferenças entre o tipo de roda do ensaio WTT e as rodas dos veículos que circulam nas estradas).

Das dificuldades encontradas destaca-se a utilização do multímetro, que realiza as leituras dos consumos de energia, revelando alguns problemas no tratamento dos dados recolhidos no que diz respeito à determinação da potência, que foram contornados posteriormente com a determinação da potência através do cálculo matemático com base nas leituras da tensão e da intensidade elétrica.

## **5.2 Trabalhos futuros**

As lajes em estudo deverão diferenciar mais nos seus parâmetros, nomeadamente ao nível da textura, uma vez que as diferenças de profundidade média da textura não se revelaram suficientes para obter uma análise da energia consumida bem clara em relação a este parâmetro.

A roda existente no equipamento de ensaio de pista revelou-se inadequada para a simulação de um veículo real que se movimenta sobre um pavimento real, uma vez que esta deveria conter um pneu idêntico ao de um veículo. As características dos pneus dos veículos permitem uma interação com a superfície do pavimento diferente daquela que foi verificada no ensaio de resistência ao rolamento. Assim, a forma como a textura e a rigidez influenciaram o consumo de energia durante este trabalho foi eventualmente diferente da que seria expectável num caso real (nomeadamente porque a área de contacto entre o pneu e a superfície da mistura também variam). A rigidez e a forma da roda no ensaio de resistência ao consumo também se revelaram inadequadas, uma vez que pode existir uma maior dificuldade em ocorrer interpenetrações da roda nas asperezas da mistura betuminosa.

Sabendo que o ensaio de pista funciona segundo um movimento cíclico de ida e volta da roda, o comportamento do consumo de energia pode variar em cada ciclo. Um método em que a

roda se movimentasse em contínuo traduzir-se-ia num comportamento do consumo de energia mais constante, que pode permitir a obtenção de resultados com menor dispersão.

Particularmente no ensaio de resistência ao rolamento realizado com a membrana de borracha, esta deverá ter no futuro uma espessura maior que 1 mm (deve ter pelo menos 10 mm) para que o efeito de redução da rigidez evidenciado por este material possa originar resultados de consumo energético mais claros em relação ao parâmetro que se pretende estudar.

As cargas mais elevadas aplicadas à roda do equipamento WTT aquando do ensaio de resistência ao rolamento, podem-se traduzir em resultados mais interessantes no que diz respeito ao módulo de rigidez e textura, uma vez que a deformação que ocorre na superfície do provete depende da carga aplicada pela roda do equipamento.

Relativamente ao estudo dos consumos de energia nos ensaios sujeitos a aquecimento, deve-se no futuro prolongar o tempo e temperatura de ensaio, de modo a que o número de ciclos mecânicos do equipamento WTT seja suficiente para que ocorram deformações no provete.

Para a determinação da textura na zona de passagem da roda, seria mais eficaz a utilização de um equipamento com tecnologia laser (*TexScan*), para uma medição mais rigorosa do perfil da textura e determinação da sua profundidade média, de modo a possibilitar uma análise mais rigorosa das alterações de textura causadas pela passagem da roda no ensaio.

Mais rigor no controlo da temperatura a que se realiza o ensaio de resistência ao rolamento poderá eventualmente tornar os resultados mais consistentes, uma vez que neste trabalho, por questões de disponibilidade do laboratório, os ensaios foram realizados em alturas diferentes do ano, originando temperaturas ligeiramente diferentes independentemente da utilização do ar condicionado na sala.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AIPCR/PIARC (2003). Surface Characteristics, Technical Document, World Road Association, Paris.
- Amos, D. (2006). Pavement Smoothness and Fuel Efficiency: An Analysis of the Economic Dimensions of the Missouri Smooth Road Initiative, Final Report, Missouri Department of Transportation, Jefferson City, Missouri.
- APA (2012). Políticas de ambiente, Lisboa, Agência Portuguesa do Ambiente; <http://www.apambiente.pt/index.php?ref=16>.
- Barth, M., Boriboonsomsin, K. (2009). Energy and emissions impacts of a freeway-based dynamic eco-driving system, Transportation Research Part D-Transport and Environment, Vol. 14 (6), pp. 400-410.
- Bendtsen, H. (2004). Rolling resistance, fuel consumption - a literature review, Road Directorate, Danish Road Institute, Roskilde, Denmark.
- Borrego, C., Lopes, M., Ribeiro, I. (2009). Sociedade, tecnologia e ambiente: um trinómio para o desenvolvimento sustentável, Seminário Valorização de Resíduos em Obras Geotécnicas, Universidade de Aveiro, Aveiro.
- Branco, F., Pereira, P., Santos, L.P. (2008). Pavimentos Rodoviários, Edições Almedina.
- 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, D.C.
- CIB (1999). Agenda 21 on sustainable construction, CIB Report Publication 237, International Council for Research and Innovation in Building and Construction, Rotterdam, The Netherlands.
- Cunha, I.J. (1990). Auxiliar técnico para projectos e manutenção elétrica, Hemus ed.
- DeRaad, L.W. (1977). The Influence of Road Surface Texture on Tire Rolling Resistance, Society of Automotive Engineers, Special Publication, Warrendale, Pennsylvania.
- Descornet, G. (1990). Road-Surface Influence on Tire Rolling Resistance. Surface Characteristics of Roadways, American Society for testing and Materials, International Research and Technologies, ASTM, Philadelphia, Pennsylvania.
- Edil, T.B. (2006). Green Highways; Strategy for recycling Materials for Sustainable Construction practices, Seventh International Congress on Advances in Civil Engineering, Istanbul, Turkey.
- Ejsmont, J.A. (1990). Tire/road noise and rolling resistance – is there a trade-off? Proceedings, vol.1, International Tire/Noise Conference, Gothenburg, Sweden.

EP (2012). Caderno de Encargos Tipo Obra; 14.03 - Pavimentação, Estradas de Portugal, S.A.

EPA (2012a). Fuel Economy Guide, Model Year 2012, U.S. Environmental Protection Agency & U.S. Department of Energy, Denver, Colorado.

EPA (2012b). Science and Technology: Sustainable Practises, U.S. Environmental Protection Agency; <http://www.epa.gov/gateway/science/sustainable.html>.

FISIPE (2012). Ficha Técnica Asphal+; [http://www.fisipe.pt/catalogo/detalhes\\_produto.php?id=3&sessao=1#](http://www.fisipe.pt/catalogo/detalhes_produto.php?id=3&sessao=1#).

Gent, A.N., Walter, J.D. (2006). The Pneumatic Tire, U.S. Department of Transportation, National Highway Traffic Safety Administration, Washington, D.C.

Hammarstrom, U., Karlsson, R., Sorensen, H. (2009). Road surface effects on rolling resistance - coastdown measurements with uncertainty analysis in focus., Swedish Natinal Road and Transport Research Institute, ed, Energy Conservation in Road Pavement Design Maintenance and Utilisation.

Heißing, B., Ersoy, M. (2011). Chassis Handbook: Fundamentals, Driving Dynamics, Components, Mechatronics, Perspectives, Vieweg+Teubner Verlag, Berlin.

Horst, E. (2000). Stone Mastique Asphalt - Pavement Technology Anais de 15º Encontro de Asfalto, IPB 62000, Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis, Rio de Janeiro.

IMTT (2009). Eco-Condução, Instituto de Mobilidade e Transportes Terrestres; <http://www.imtt.pt/sites/IMTT/Portugues/Condutores/Ecoconducao/Paginas/Ecoconducao.aspx>.

INE (2010). Estatísticas dos Transportes 2010, Instituto Nacional de Estatística, I.P., Lisboa.

InIR (2009). Directivas para a concepção de pavimentos - Critérios de dimensionamento, Instituto de Infra-estruturas Rodoviárias, Lisboa.

Menezes, M. (2008). Estudo das características de superfície de pavimentos rodoviários para análise da segurança do tráfego, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.

Menzies, T.R., Zucchetto, J. (2006). Tires and Passenger Vehicle Fuel Economy, Transportation Research Board, Washington, D.C.

Occam (2010). Manual de eco-condução, Projeto Eco-Condução Portugal ed, ACAP - Associação Automóvel de Portugal

Pereira, P., Miranda, C. (1999). Gestão da Conservação dos Pavimentos Rodoviários, Universidade do Minho, Braga.

Pesaran, A. (2011). A Vision of Our Transportation Future - The Next 30 Years, National Renewable Energy Laboratory - Advanced Vehicles & Fuels Research; [http://www.nrel.gov/vehiclesandfuels/energystorage/feature\\_vision.html](http://www.nrel.gov/vehiclesandfuels/energystorage/feature_vision.html).

Río, R.C. (1999). *Calidad Ante La Rodadura, Jornadas Sobre La Calidad En El Proyecto Y La Construcción De Carreteras* - AEPO Ingenieros Consultores, Barcelona.

Sandberg, U. (1997). *Influence of Road Surface Texture on Traffic Characteristics Related to Environment, Economy and Safety. A State-of-the-art Study regarding Measures and measuring Methods*. VTI notat 53A, Swedish National Road and Transport Research Institute., Linköping, Sweden.

Sandberg, U. (2002). *Tyre/Road Noise Reference Book*, Informex, Kisa, Sweden.

Sandberg, U., Ejsmont, J.A. (2000). *Noise emission, friction and rolling resistance of car tires - Summary of an experimental study.*, Proceedings of the 2000 National Conference on Noise Control Engineering (NOISE-CON 2000), Swedish National Road and Transport Research Institute, Newport Beach, California.

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*. External Report, NCC & Dynatest, Vejen, Denmark.

Seco, Á.J.d.M., Ferreira, S.M.P., Silva, A.M.B., Costa, A.H.P.d. (2008). *Manual do Planeamento de Acessibilidades e Transportes - Segurança Rodoviária*, Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional Do Norte

USDE (2012). *Fuel Economy: Where the Energy Goes*, United States Department of Energy; <http://www.fueleconomy.gov/feg/atv.shtml>.

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

Wong, J.Y. (2001). *Theory of Ground Vehicles*, John Wiley & Sons, Inc. 3rd Edition, New Jersey.