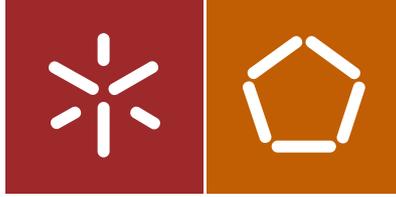




Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Joana Maciel Ferreira da Costa

Estudo do efeito da temperatura no ruído
pneu-pavimento e nos parâmetros acústicos
das camadas superficiais



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Joana Maciel Ferreira da Costa

Estudo do efeito da temperatura no ruído
pneu-pavimento e nos parâmetros acústicos
das camadas superficiais

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

Trabalho efetuado sob a orientação da
Professora Doutora Elisabete Fraga de Freitas

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a várias pessoas, porque sem elas esta dissertação não seria possível. Principalmente à Doutora Elisabete Freitas, pela orientação, apoio e acompanhamento que me deu do início ao fim, a sua paciência e compreensão, quando as coisas não corriam como era suposto.

Ao técnico do laboratório de Vias de Comunicação, Hélder Torres, e à Catarina Cupertino, pela disponibilidade que tiveram em ajudar-me nos ensaios de campo e todos os ensinamentos que me deram, a cada dificuldade que obtive.

À minha colega e amiga Ana Catarina Gomes, que sei que sem ela não conseguiria estar na fase em que estou. Obrigada todo o apoio que me deste nestes anos todos, não só neste ano final como todos os outros anteriores, foste, sem dúvida, a minha moleta, o meu braço direito, o meu “tijolinho”. Aos meus amigos, Barrote e Mi, que sempre estiveram comigo ao longo dos últimos 2 anos, incentivaram-me, motivaram-me e sei que vão continuar a fazê-lo, em tudo o que se proporcionar. Obrigada pela vossa amizade.

Agradecer, aos meus pais, pela educação e valores que me deram, pela confiança que depositaram em mim ao longo destes anos, são um exemplo a seguir. Obrigada por me apoiarem em todas as minhas decisões e por acreditarem em mim em todas as circunstâncias. À minha irmã que teve sempre a curiosidade em saber como estava a decorrer os ensaios e a escrita da tese, querendo sempre ajudar em tudo o que pudesse.

Ao meu padrinho, que não teve a oportunidade de estar aqui, neste momento tão importante para mim, e à minha madrinha que sempre teve o maior carinho por mim e me trata sempre como uma filha. Foram eles que me puseram este “bichinho” pela Engenharia Civil. Obrigada.

Por fim, agradecer ao Zé, dizer que não há palavras para exprimir o quanto é importante para mim e como o seu carinho, amor, motivação e compreensão me fizeram suster alguns momentos difíceis e superá-los da melhor forma. Desculpa, se houveram momentos em que a minha paciência era minúscula.

Resumo

O ruído do tráfego rodoviário é um dos principais contribuintes para o ruído ambiental, levantando várias questões pois, se por um lado, está associado a vários problemas de saúde e bem-estar, por outro a sua falta constitui um risco para a segurança dos utilizadores da estrada. Assim, torna-se imprescindível o estudo e a avaliação acústica dos pavimentos rodoviários, visto que as suas características superficiais atuam de forma ativa nos mecanismos de geração do ruído pneu-pavimento. A temperatura do ar é um dos fatores que influencia o ruído rodoviário. Os seus efeitos determinam, não só o modo de propagação das ondas sonoras, como também a própria emissão dessas ondas.

O trabalho desenvolvido nesta dissertação tem por objetivo estudar o efeito da temperatura no ruído da interação do pneu com o pavimento e nos parâmetros acústicos das camadas superficiais, com o recurso a vários métodos de ensaio. Para a aquisição do ruído pneu-pavimento utilizou-se o método de proximidade imediata, o método CPX. Por sua vez, para a avaliação do amortecimento do pavimento, foi utilizado o método da impedância mecânica e para a absorção do pavimento o método da impedância acústica. Este trabalho apresenta, para três tipos de pavimento diferentes, Betão Betuminoso Clássico, Betão Betuminoso Drenante e Mistura betuminosa com betume modificado com borracha, a sua caracterização acústica através de dois indicadores acústicos (L_{Amax} e L_{Aeq}) em função da velocidade de circulação, da temperatura do pavimento e das características acústicas das camadas superficiais do pavimento em estudo (amortecimento e absorção sonora).

A análise dos resultados é apresentada sob várias abordagens, sendo as principais, a análise da relação dos níveis de pressão sonora com a temperatura do pavimento, a análise dos níveis de pressão sonora com o amortecimento e a análise da relação entre os níveis de pressão sonora com a absorção do pavimento. Com os resultados pode-se concluir que todos os parâmetros estudados, exceto a absorção, são influenciados pela temperatura, tanto a do ar como a do pavimento.

Palavras-Chave: Ruído pneu/pavimento; Temperatura; Amortecimento; Absorção; Dureza do pneu.

Abstract

The noise from road traffic is a major contributor to environmental noise, raising various issues if, for one hand, is associated with various health problems and welfare, on the other its absence, it's a risk for the safety of the users of the road. So, the study and evaluation of the acoustic road surfaces becomes essential, because their surface characteristics actively influence the generation mechanisms of the tire-pavement noise. The temperature of the air is one of the factors that influence the road noise. His effect determines not only the propagation way of the sound waves, but also his own issuance of these waves.

The work developed in this thesis aims to study the effect of the temperature on the noise of the interaction of the tire with the ground and the acoustic parameters of the surface layers, with the resource of multiple test methods. For the acquisition of the tire-pavement noise was used the method of immediate proximity, CPX method. In turn, for evaluation of the damping of the deck, it was used the method of the mechanical impedance, and for the absorption of the pavement, the method of acoustic impedance.

This work presents, for three different types of pavement, bituminous concrete Classic, bituminous concrete and bituminous mix with bitumen modified with rubber, their acoustic characterization by two acoustic indicators (L_{Amax} and L_{Aeq}) according to the speed of movement, the temperature of the floor and the acoustic characteristics of the surface layers of the floor under study (damping and sound absorption).

The results are showed under various approaches. The main analysis are, the relationship of the sound pressure levels with floor temperature, the analysis of the sound pressure levels with cushioning and the analysis of the relationship between the sound pressure levels with absorption of the pavement. With the results, it can be concluded that the temperature, both the air and the ground, influences all the parameters studied, except the absorption.

Keywords: Noise; Tire/road noise; Temperature; Damping; Absorption, Tire hardness.

ÍNDICE

1. Introdução	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Objetivos e metodologias.....	2
1.3 Organização	3
2. Acústica Rodoviária.....	5
2.1 Princípios da acústica.....	5
2.2 Indicadores de Ruído Ambiental	7
2.3 Controlo de Ruído.....	11
2.4 Ruído Rodoviário.....	12
2.4.1 Propagação do ruído rodoviário.....	13
2.4.2 Métodos de avaliação do ruído pneu-pavimento	14
2.5 Fatores que influenciam o ruído rodoviário.....	17
2.5.1 Veículos	17
2.5.2 Superfície do pavimento	20
2.5.3 Clima.....	24
2.6 Impedância Mecânica	25
2.7 Impedância Acústica.....	28
2.8 Influência da Temperatura	29
2.8.1 Projeto de Fabienne Anfosso-Lédée e Yves Pichaud	30
2.8.2 Projeto HARMONOISE	32
2.8.3 Projeto CNOSSOS.....	36
2.8.4 Projeto Suíço.....	37
2.8.5 Comparação e Discussão dos resultados dos Projetos.....	39
3. Materiais e Métodos Experimentais	43
3.1 Avaliação das temperaturas	44

3.2 Avaliação do ruído pneu/pavimento	45
3.3 Avaliação do amortecimento	46
3.4 Avaliação da impedância acústica	47
3.5 Avaliação da dureza do pneu	48
3.6 Caracterização do veículo de ensaio e pneu de ensaio	49
4. Apresentação e discussão dos resultados	51
4.1 Caracterização e análise das condições meteorológicas e temperatura do pavimento.....	51
4.2 Caracterização do ruído pneu/pavimento	56
4.3 Caracterização e análise da dureza do pneu	66
4.4 Caracterização e análise dos resultados do ensaio de amortecimento.....	68
4.5 Caracterização e análise dos resultados do ensaio de absorção.....	70
4.6 Relação entre o ruído pneu/pavimento e o amortecimento do pavimento.....	73
4.7 Relação entre o ruído pneu/pavimento e a dureza do pneu	75
5. Conclusões	77
5.1 Conclusões Gerais	77
5.2 Desenvolvimentos futuros	79
6. Referências Bibliográficas	81

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Efeitos do ruído na saúde em relação ao número de pessoas afetadas (WHO, 2011)	1
Figura 2 - Variações de pressão produzida por uma fonte sonora (som ou ruído) (Mateus, 2008)	6
Figura 3 - Princípios Físicos do som	6
Figura 4 - Variação no nível de ruído rodoviário e o nível de ruído equivalente, LAeq, dB (FEHRL, 2006)	10
Figura 5 - Sonómetro e Pulse.....	10
Figura 6 - Soluções para reduzir o ruído ambiente (Silva, 2012).....	11
Figura 7 - Fontes do ruído rodoviário: interação pneu/pavimento (à esquerda) e o funcionamento do veículo (à direita) (Santos, 2007).....	12
Figura 8 - Efeito da distância sobre uma linha de fontes de ruído situada ao longo de uma superfície pavimentada (Hanson, et al., 2005).....	14
Figura 9 - Decréscimos do nível de pressão sonora função do decréscimo de volume (Raitanen, 2005).....	14
Figura 10 - Variação dos valores de $L_{máx}$, para quatro veículos diferentes, com o aumento da velocidade (Antunes, et al., 2008).....	18
Figura 11 - Estrutura do pneu (Adaptado de http://www.renaultclube.com/tudo-sobre-pneus/).....	19
Figura 12 - Megatextura (Descornet, et al., 2006).....	23
Figura 13 - Ondas refletidas, absorvidas e transmitidas (adaptado de (Tijs, 2013))	28
Figura 14 - Refração do som com os gradientes de temperatura. a) Gradiente de temperatura negativo. b) Gradiente de temperatura positivo.....	30
Figura 15 - Superfícies de estrada em estudo a) Betão betuminoso drenante; b) Betão betuminoso clássico; c) Betão betuminoso com mistura de borracha	43
Figura 16 - Termómetro (a) e anemómetro (b).....	45
Figura 17 - Método CPX. a) Posição e respetivas distâncias dos microfones (ISO/DIS11819-2, 2012); b) Montado no pneu de ensaio.....	45
Figura 18 - Método utilizado para a medição do amortecimento a) Esquema representativo e b) Método aplicado in situ	46
Figura 19 - a) Esquema do tubo de Kundt (Tijs, 2013); b) Tudo montado no local de estudo	47

Figura 20 - Durómetro (ASTM D2240-00,2002)	48
Figura 21 - Pontas de Durómetros (ASTM D2240-00,2002)	48
Figura 22 - Medição da dureza do pneu, com auxílio de um durómetro	49
Figura 23 - Veículo e pneu utilizados no estudo	49
Figura 24 - Temperatura do ar e a temperatura do pavimento drenante: a) em função do tempo; b) relação entre as duas temperaturas	54
Figura 25 - Temperatura do ar e a temperatura do pavimento clássico: a) em função do tempo; b) relação entre as duas temperaturas	55
Figura 26 - Temperatura do ar e a temperatura do pavimento borracha: a) em função do tempo; b) relação entre as duas temperaturas	55
Figura 27 - Nível de Pressão Sonora Equivalente dependendo da Temperatura do Pavimento, a 75 km/h	59
Figura 28 - Nível de Pressão Sonora Máximo dependendo da Temperatura do Pavimento, a 75 km/h.....	59
Figura 29 - Nível de pressão sonora equivalente dependendo da temperatura do pavimento, a 50 km/h.....	61
Figura 30 - Nível de pressão sonora máxima dependendo da temperatura do pavimento, a 50 km/h	61
Figura 31 - Nível de pressão sonora equivalente dependendo da temperatura do pavimento drenante, a 110 km/h.....	62
Figura 32 - Nível de pressão sonora máxima dependendo da temperatura do pavimento, a 110 km/h	63
Figura 33 - Variação do nível de pressão sonora equivalente em relação à temperatura do pavimento, para as velocidades de 50 e 75 km/h, no betão betuminoso com mistura de borracha.....	63
Figura 34 - Variação do nível de pressão sonora máxima em relação à temperatura do pavimento, para as velocidades de 50 e 75 km/h, no betão betuminoso com mistura de borracha.....	64
Figura 35 - Variação do nível de pressão sonora equivalente em relação à temperatura do pavimento, para as velocidades de 50 e 75 Km/h, no betão betuminoso clássico.....	64
Figura 36 - Variação do nível de pressão sonora máxima em relação à temperatura do pavimento, para as velocidades de 50 e 75 Km/h, no betão betuminoso clássico.....	65
Figura 37 - Variação do nível de pressão sonora equivalente em relação à temperatura do pavimento, para as velocidades de 75 e 110 Km/h, no betão betuminoso drenante.....	65

Figura 38 - Variação do nível de pressão sonora máxima em relação à temperatura do pavimento, para as velocidades de 75 e 110 Km/h, no betão betuminoso drenante.....	66
Figura 39 - Dureza do pneu em relação à temperatura do ar e do pavimento drenante ...	67
Figura 40 - Dureza do pneu em relação à temperatura do ar e do pavimento clássico.....	67
Figura 41 - Dureza do pneu em relação à temperatura do ar e do pavimento com borracha	68
Figura 42 - Relação entre o amortecimento e a temperatura do ar e do pavimento clássico	69
Figura 43 - Relação entre o amortecimento e a temperatura do ar e do pavimento drenante.....	69
Figura 44 - Relação entre o amortecimento e a temperatura do ar e do pavimento com borracha.....	70
Figura 45 - Discrepância dos valores do betão betuminoso drenante, comparando com os outros tipos de pavimento	72
Figura 46 - Relação da absorção com o betão betuminoso clássico e o betão betuminoso com mistura de borracha a várias temperaturas	73
Figura 47 - Relação entre o amortecimento e o nível de pressão sonora.....	74
Figura 48 - Relação entre a dureza do pneu e o nível de pressão sonora equivalente.....	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tipos de pavimento utilizados	31
Tabela 2 - Fator de correção (Anfosso-Lédée, et al., 2007).....	32
Tabela 3 - Resumo das categorias de veículos a serem utilizados.....	33
Tabela 4 - Resumo dos vários tipos de pavimento a serem usadas.....	34
Tabela 5 - Coeficientes de Temperatura para diferentes superfícies (HARMONOISE, 2003)	35
Tabela 6 - Resumo das categorias de veículos a serem utilizados.....	36
Tabela 7 - Coeficientes de temperatura para diferentes superfícies Categoria 1	37
Tabela 8 - Coeficientes de temperatura para diferentes superfícies Categoria 2 e 3	37
Tabela 9 - Tipos de pavimento utilizados	38
Tabela 10 - Coeficientes da temperatura em relação ao tipo de pavimento e tipo de pneu	39
Tabela 11 - Coeficientes K, do projeto Francês e HARMONOISE, em CPB	41
Tabela 12 - Coeficientes K, do projetos CNOSSOS e Suíço, em CPX	41
Tabela 13 - Valores da temperatura do ar e da temperatura do pavimento para cada tipo de pavimento.....	53
Tabela 14 - Valores dos Níveis de Pressão Sonora corrigidos, para as velocidades pretendidas	57
Tabela 15 - Ruído pneu/pavimento, para a velocidade de 75 Km/h, de todos os pavimentos estudados	58
Tabela 16 - Ruído pneu/pavimento, para a velocidade de 50 km/h, dos tipos de pavimento de Betão Betuminoso com mistura de Borracha e Betão Betuminoso Clássico	60
Tabela 17 - Ruído pneu/pavimento, para a velocidade de 110 km/h, do tipo de pavimento de Betão Betuminoso Drenante	62

Tabela 18 - Valores da dureza do pneu e as respectivas temperaturas da superfície da estrada	67
Tabela 19 - Valores das frequências e do amortecimento do pavimento clássico	68
Tabela 20 - Valores das frequências e do amortecimento do pavimento drenante.....	69
Tabela 21 - Valores das frequências e do amortecimento do pavimento com borracha...	70
Tabela 22 - Valores da absorção de cada tipo de pavimento (bandas 1/3 oitava)	71
Tabela 23 - Valores do Nível de Pressão Sonoro corrigidos	74
Tabela 24 - Valores da dureza do pneu	75

1. INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

As cidades de hoje são afetadas, constantemente, por emissões de poluentes e ruído, provenientes de fontes domésticas e industriais, sendo o tráfego motorizado o mais importante emissor, comprometendo assim, a vida dos seus habitantes (Silva, 2012).

O relatório da Organização Mundial de Saúde (OMS), elaborado em 2011, confirma mais uma vez o tráfego rodoviário como a principal fonte de ruído em meio urbano (WHO, 2011). Sendo que este condiciona consideravelmente a qualidade de vida das pessoas expostas a este tipo de emissão poluente.

Cerca de 90% da população europeia está exposta ao ruído produzido pelo tráfego rodoviário. Como consequências dessa exposição podem ocorrer efeitos na saúde, como por exemplo, perturbações no sono, interferências na comunicação e no desempenho intelectual, assim como, incomodidade (Silva, 2012). A Figura 1 apresenta alguns exemplos de consequências provocadas pelo ruído, ordenados hierarquicamente em relação ao número de pessoas afetadas pelo ruído.



Figura 1 - Efeitos do ruído na saúde em relação ao número de pessoas afetadas (WHO, 2011)

As condições atmosféricas, que são um dos principais fatores que influencia o ruído, determinam o modo de propagação das ondas sonoras e a emissão dessas ondas. Além disso podem alterar as propriedades dos materiais, como é o caso da temperatura. A

temperatura do pavimento, que provém da temperatura do ar e de mais aspetos, como o contacto do pneu em movimento com o pavimento, influencia o ruído resultante da interação pneu/pavimento e a velocidade do vento condiciona o ruído aerodinâmico dos veículos (Santos, 2007).O amortecimento e a absorção sonora dos pavimentos são parâmetros acústicos diretamente relacionados com as propriedades dos materiais, também influenciados pela temperatura.

1.2 Objetivos e metodologias

O principal objetivo desta dissertação consiste no *estudo do efeito da temperatura no ruído causado pelo contacto do pneu no pavimento e nos parâmetros acústicos das camadas superficiais do pavimento*. Pretende-se determinar a relação entre o nível de ruído pneu-pavimento em camadas superficiais, com diferentes materiais, como por exemplo, com borracha reciclada de pneus, e ainda das propriedades acústicas dessas camadas, com a temperatura do ar e do pavimento.

De modo a cumprir o objetivo principal, é essencial que sejam cumpridos uma série de objetivos secundários:

- Definir a relação entre o ruído e a temperatura;
- Definir a relação entre a absorção e a temperatura;
- Definir a relação entre o amortecimento e a temperatura;
- Definir a relação entre o ruído e a absorção;
- Definir a relação entre o ruído e o amortecimento.

Atendendo aos objetivos apresentados anteriormente, é necessário estabelecer um conjunto de metodologias que possibilitem a preparação e execução das tarefas necessárias.

Inicialmente pretende-se atualizar o estado do conhecimento com o estudo bibliográfico de documentos e investigações efetuadas no âmbito do ruído rodoviário; A seguir é necessário selecionar os trechos a estudar e preparar o protocolo do ensaio a realizar,

tendo em conta todos os métodos de estudo para avaliação dos parâmetros acústicos, como absorção e o amortecimento. Os ensaios a realizar em cada trecho são:

- Avaliação do ruído pelo método de proximidade imediata (CPX);
- Avaliação da impedância mecânica, para determinação do amortecimento;
- Avaliação da impedância acústica, pelo método do Tundo de Kundt adaptado.

Para a análise dos resultados obtidos nos ensaios, será estabelecida a relação entre os parâmetros estudados, como o ruído e a temperatura, a absorção e a temperatura, o amortecimento e a temperatura, o ruído e a absorção e o ruído e o amortecimento.

1.3 Organização

Com o objetivo de enquadrar os diferentes assuntos e fases do trabalho, esta dissertação está organizada em cinco capítulos.

O primeiro capítulo corresponde à introdução, na qual se encontra o enquadramento e a pertinência do estudo do ruído rodoviário proveniente da interação pneu-pavimento, e os objetivos da realização deste trabalho, bem como a sua metodologia.

O capítulo dois faz parte do estado do conhecimento, isto é, apresenta informações e estudos relevantes no âmbito do tema da dissertação. Neste capítulo, aborda-se os princípios da acústica, o ruído rodoviário, os fatores que o influenciam, os vários tipos de pavimentos, e conceitos sobre a influência da temperatura no ruído, tendo em conta vários projetos já existentes.

O terceiro capítulo descreve os materiais, as metodologias e os procedimentos utilizados nos ensaios deste trabalho, como a obtenção do ruído pneu-pavimento, a absorção sonora e o amortecimento do pavimento.

No quarto capítulo é apresentada a análise e discussão dos resultados obtidos. Neste, encontram-se os resultados das aquisições realizadas pelos métodos utilizados para a obtenção dos dados do ruído da interação do pneu-pavimento, da absorção e do

amortecimento do pavimento. Para uma melhor percepção e leitura dos resultados estes são apresentados sob a forma de tabelas e gráficos.

Finalmente, no capítulo cinco é apresentada uma síntese do trabalho efetuado, salientando-se as conclusões mais relevantes, são também sugeridos desenvolvimentos futuros que possam dar continuidade ao estudo desenvolvido no âmbito da presente dissertação.

2. ACÚSTICA RODOVIÁRIA

As vibrações transmitidas no ar produzem uma variação de pressão, gerando uma onda sonora que pode ser detetada pelo ouvido humano. A onda sonora, ou som, produz uma sensação de audição que pode ser agradável ou desagradável. O ruído é, por sua vez, um som indesejado ou que não apresenta interesse pelo recetor. Após períodos longos de exposição, o ruído causa incomodidade nos recetores, produzindo, nestes, reações adversas (Santos, 2007).

A medição do ruído e a avaliação da incomodidade apoia-se em parâmetros físicos que permitem definir escalas de ruído, que por sua vez, estabelecem indicadores de ruído.

Assim, neste capítulo apresentam-se os principais parâmetros físicos relativos à percepção e caracterização do som, as escalas atualmente usadas e os principais indicadores de incomodidade, nomeadamente os recentemente preconizados pela Comunidade Europeia. Apresentam-se ainda, os principais mecanismos de geração e de propagação do ruído rodoviário. Destes mecanismos destacam-se os relativos ao contacto entre o pneu e o pavimento, dada a sua predominância a velocidades superiores a 50 km/h (Sanz, 2006).

Os equipamentos e os métodos mais utilizados na medição do ruído ambiental e do tráfego rodoviário, também são apresentados no final deste capítulo.

2.1 Princípios da acústica

A acústica é a ciência que se dedica ao estudo do som e/ou do ruído, à sua propagação, nos três estados, gasoso, líquido ou sólido, e às suas inter-relações com o ser humano. O som e/ou ruído pode definir-se como qualquer variação de pressão atmosférica que o ouvido humano pode captar (Figura 2). A distinção entre som e ruído é subjetiva, não depende apenas da frequência e da amplitude, sendo, no entanto, o som associado a sensações agradáveis (música e voz) e o ruído associado a sensações indesejáveis (Mateus, 2008).

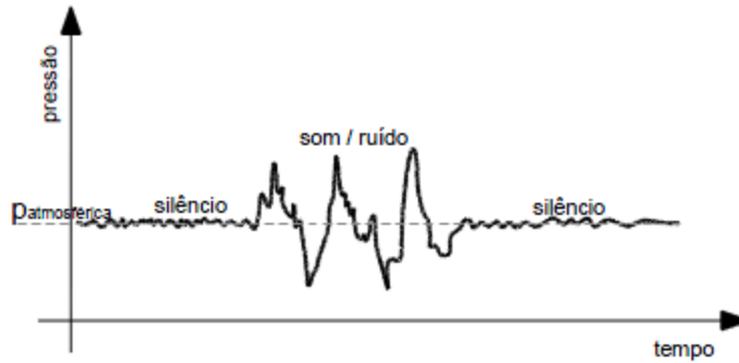


Figura 2 - Variações de pressão produzida por uma fonte sonora (som ou ruído) (Mateus, 2008)

As ondas sonoras produzidas pelos corpos em vibração podem ser caracterizadas a partir de 3 parâmetros: a amplitude, o comprimento de onda e o período (Figura 3).

A amplitude (A) corresponde à pressão máxima ou mínima gerada pela vibração sonora, o comprimento de onda (λ) é a distância percorrida pelo som ou onda vibratória durante um ciclo de pressão, e o período (t) corresponde ao intervalo de tempo que uma partícula leva a percorrer um ciclo de pressão. Tendo em conta a definição de período, o comprimento de onda corresponde ao espaço percorrido pela onda num período, e este depende das características da fonte e das propriedades do meio de propagação (Santos, 2007).

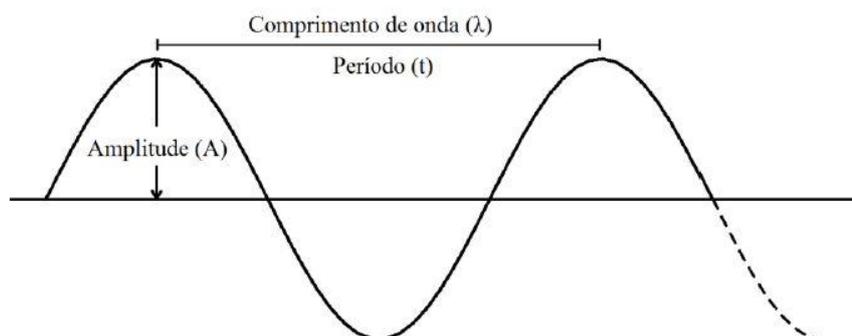


Figura 3 - Princípios Físicos do som

O som produz uma impressão de audição agradável ou desagradável consoante as circunstâncias impostas. Por sua vez, o ruído é um som indesejado, não apresentando qualquer interesse para o recetor. Ser um som indesejado é ser um ruído que causa

incomodidade nos recetores, após períodos longos de exposição, originando reações adversas (Silva, 2012).

A frequência é o número de ocorrências de oscilação da onda num determinado tempo, numa posição fixa no espaço ou num meio sólido, e é expresso em Hertz (Hz), que corresponde a um ciclo por segundo (Santos, 2007).

A unidade internacional, usada para descrever as flutuações da pressão sonora, é o decibel. O decibel é, por natureza logarítmico, geralmente abreviado pela nomenclatura dB e indica o nível de pressão sonora (L_p). O nível de pressão sonora é calculado pela Equação 1 (Wayson, 1998).

$$L_p = 10 \log_{10} \left(\frac{p^2}{p_o^2} \right) \quad (1)$$

Em que:

L_p representa o nível de pressão sonora (dB);

p representa a pressão sonora instantânea (Pa);

p_o representa a pressão sonora de referência ($2 \times 10^{-5} Pa = 20 \mu Pa$)

À alteração da pressão do ar relativamente ao valor médio da pressão atmosférica, quando comparada com um valor de referência, dá-se o nome de nível de pressão sonora (L_p).

2.2 Indicadores de Ruído Ambiental

Segundo o Decreto-Lei n.º 9 de 17 de Janeiro de 2007, um indicador de ruído é o parâmetro físico-matemático para a descrição do ruído ambiente que tenha uma relação com um efeito prejudicial na saúde ou no bem-estar do ser humano (DL, 2007).

O ruído varia ao longo do tempo, revelando quebras e picos ao longo do sinal, e tanto pode ser contínuo, como é o caso do ruído do tráfego, ou algo pontual, durando apenas frações de segundo. Por esta razão, para avaliar o ruído são geralmente utilizados determinados indicadores que caracterizam o ambiente acústico exterior (Cunha, 2013).

Em relação à duração do som, são utilizados vários indicadores de ruído para uma descrição eficaz de como o nível de som varia ao longo do tempo, entre os quais: o nível de ruído máximo ($L_{m\acute{a}x}$), o nível de pressão sonora (L_{xx}) e o nível sonoro contínuo equivalente (L_{eq}). Em cada um destes descritores, a letra L (maiúscula) representa que, cada um corresponde a um nível de pressão sonora, e não pressão sonora, embora as unidades sejam as mesmas, o decibel (dB) (Santos, 2007).

O L_{eq} é o nível sonoro contínuo equivalente, e assume-se como um nível de pressão sonora constante durante determinado período de tempo. Este é considerado o indicador mais representativo do ruído ambiental de um determinado local durante um certo intervalo de tempo, sendo por isso essencial para a maior parte das avaliações acústicas (IA, 2004). Como este valor é uma média, representa a energia total do ruído, e permite fazer uma fácil e precisa leitura, fazendo deste um melhor indicador de potenciais danos na audição, ou possíveis queixas de ruído (Mendonça, 2012).

Os L_{min} e $L_{m\acute{a}x}$ são respetivamente o nível de pressão sonora mínimo e máximo registado durante o período de medição.

O L_{xx} representa os indicadores estatísticos, isto é, níveis de pressão sonora que foram excedidos durante uma certa percentagem de tempo durante a medição. Os mais utilizados são o L_{10} e o L_{95} , que correspondem aos níveis de pressão sonora excedidos em 10% e 95% do tempo de medição, respetivamente. O L_{10} é um bom indicador para caracterizar a ocorrência dos níveis de pressão sonora mais elevados, e o L_{95} para caracterizar o “ruído de fundo”. O L_{50} é um parâmetro de grande utilidade prática, porém por questões de segurança é mais comum usar o L_{eq} (Silva, 2012).

Entre os indicadores de ruído existem ainda os níveis sonoros contínuos equivalentes por períodos do dia (DL, 2007): Sendo estes indicadores utilizados somente em medição do ruído ambiental.

- O indicador de ruído diurno (L_{dia} ou L_d), referente a um período entre as 7.00 e as 20.00 horas;
- O indicador de ruído do entardecer ($L_{entardecer}$ ou L_e), que corresponde ao período entre as 20.00 e as 23.00 horas;

- O indicador de ruído noturno (L_{noite} ou L_n), que avalia o período entre as 23.00 e as 7.00 horas; e ainda o indicador de ruído composto (L_{den}), que corresponde ao período do dia total.

Conforme o Decreto-Lei n.º 9 de 17 de Janeiro de 2007, para verificar o cumprimento do critério de incomodidade considera-se a diferença entre o valor do indicador L_{eq} do ruído ambiente, determinado durante a ocorrência do ruído particular da atividade ou atividades em avaliação, e o valor do indicador L_{eq} do ruído residual (DL, 2007).

A diferença não pode exceder (DL, 2007):

- 5 dB(A) no período diurno;
- 4 dB(A) no período do entardecer;
- 3 dB(A) no período noturno.

O dB(A) também pode ser a unidade do nível sonoro contínuo equivalente, caso a análise do ruído seja feita com a ponderação A, bem como a dB, caso contrário. No caso da análise do ruído ser feita com a ponderação A, o nível sonoro contínuo equivalente representa-se por LA_{eq} (Santos, 2007).

Assim, o nível sonoro contínuo equivalente ponderado A é expresso pela Equação 2 (FEHRL, 2006):

$$L_{Aeq} = 10 \log_{10} \left[\frac{1}{T} \int_0^T \frac{p(t)^2}{p_o^2} dt \right] \quad (2)$$

Em que:

L_{Aeq} representa o nível sonoro contínuo equivalente ponderado A (dB(A));

T o período de tempo durante o qual se calcula L_{Aeq} , em segundos;

p a pressão sonora instantânea ponderada em A (Pa);

p_o a pressão sonora de referência (2×10^{-5} Pa = 20 μ Pa).

De forma a ilustrar o conceito de L_{Aeq} , a Figura 4, apresenta uma variação típica do nível de ruído relativo a uma estrada movimentada (FEHRL, 2006).

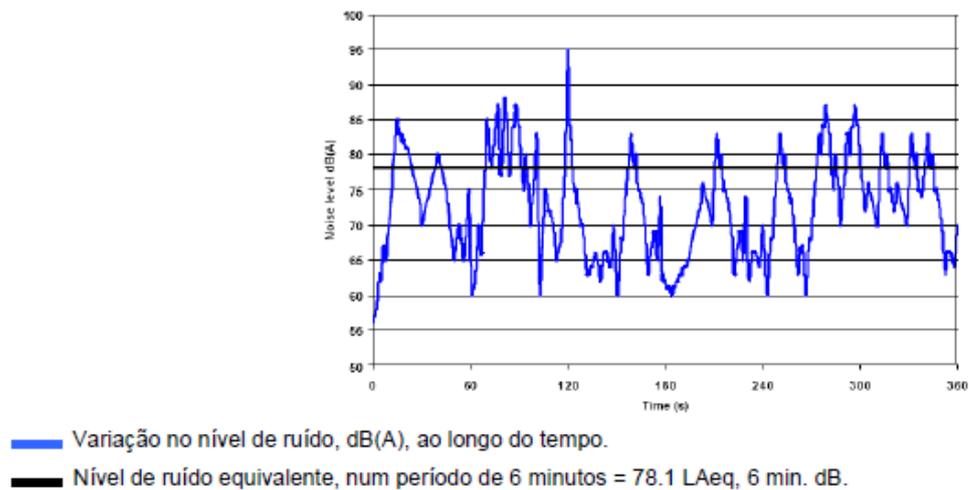


Figura 4 - Variação no nível de ruído rodoviário e o nível de ruído equivalente, LAeq, dB (FEHRL, 2006)

Existem vários equipamentos de medição sonora (Figura 5), que calculam os indicadores de ruído, nomeadamente os sonómetros e/ou analisadores integradores com análise em frequência. Estes equipamentos permitem a obter níveis sonoros quer em dB quer em dB(A), ou noutra ponderação.



Figura 5 – Sonómetro e Pulse

Os indicadores ambientais referidos também são utilizados noutros métodos de avaliação de ruído, como o rodoviário.

2.3 Controlo de Ruído

O controlo do ruído é fundamental para o bem-estar da vida humana. Existem três parâmetros importantes, a ter em conta, antes de intervir nas áreas afetadas pelo ruído ambiente, a localização das principais fontes de ruído, a identificação dessas áreas e a sua caracterização. Estes parâmetros fornecem também bases para avaliar as consequências de medidas de controlo de ruído implementadas nessas áreas mais críticas (Silva, 2012).

Existem várias soluções para a redução do ruído ambiente, intervindo em três pontos diferentes, podendo-as sistematizar da seguinte forma: atuação na fonte de ruído, realizando medidas de proteção ativa, na propagação, efetuando medidas de proteção passiva e diretamente nos recetores (Silva, 2012). Na Figura 6 estão representadas as três soluções para a redução do ruído ambiente, podendo verificar que neste caso, nesta dissertação, o objeto de estudo é a fonte.



Figura 6 - Soluções para reduzir o ruído ambiente (Silva, 2012)

As medidas de proteção ativa consistem essencialmente na intervenção direta na fonte, e podem-se destacar as intervenções levadas a cabo no tipo de pavimento utilizado, intervenções no perfil das vias rodoviárias, medidas de acalmia de tráfego, como por exemplo a redução da velocidade de circulação e segregação de tráfego, e gestão de tráfego. As medidas de proteção passiva dizem respeito à intervenção durante a propagação do ruído, isto é, atuando durante o percurso entre a fonte e o recetor, como por exemplo a colocação de barreiras acústicas, cortinas arbóreas e túneis artificiais. As intervenções nos recetores incluem medidas levadas a cabo nos edifícios (Silva, 2012).

Estas medidas de controlo de ruído devem ser analisadas hierarquizando-as, dando como primeira prioridade à atuação na fonte, seguindo-se as medidas de atuação na propagação e em último recurso a atuação no recetor, devido à perda de eficácia global das mesmas (Silva, 2012).

2.4 Ruído Rodoviário

O ruído proveniente do tráfego rodoviário advém de três tipos de fontes, o ruído originado pelo funcionamento do veículo (motor), o ruído da interação pneu/pavimento e do ruído aerodinâmico, tal como ilustrado na Figura 7 (Santos, 2007).

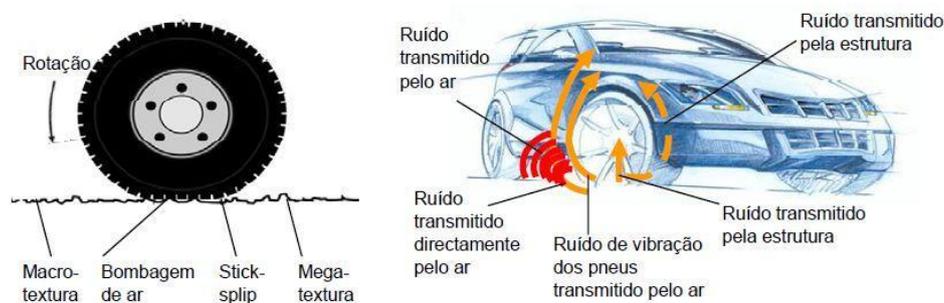


Figura 7 – Fontes do ruído rodoviário: interação pneu/pavimento (à esquerda) e o funcionamento do veículo (à direita) (Santos, 2007)

Os mecanismos de emissão do ruído pneu/pavimento podem ser de origem mecânica e aerodinâmica.

Os ruídos mecânicos provêm do ruído do motor, do ruído pneu/pavimento e do ruído gerado pela turbulência do vento, que oferecem contributos diferentes relativamente à emissão de ruído global, a velocidades diferentes. No ruído gerado pelo próprio veículo intervêm os elementos vibrantes que participam na propulsão, tais como o motor, a transmissão, os travões, o escape, a suspensão e outros componentes do veículo.

A interação entre a carroçaria do veículo e o ar dá origem ao ruído aerodinâmico, dependendo da forma da carroçaria. Este tipo de ruído aumenta à medida que a velocidade do veículo aumenta. Existe ainda ruído aerodinâmico resultante dos mecanismos de geração aerodinâmica provêm do efeito de bombeamento de ar originado do momento em que o pneu interage com a superfície do pavimento, da ressonância da

cavidade no tubo do pneu, da radiação da ressonância de ar e da ressonância tubular (Sandberg, et al., 2002).

O ruído global da interação do pneu com o pavimento depende de muitos fatores, como, o modelo e a idade do veículo, o peso do eixo, o tamanho e a temperatura do pneu, a textura e o material do pneu, tipo (Verão/Inverno, ranhurado/dentado) e a pressão do pneu e por fim a superfície da estrada. Esta última depende do estado de conservação e da temperatura, assim como da velocidade que o veículo circula (Sainio, 2003).

As características da superfície do pavimento e dos pneus, o comportamento dos condutores e o clima, podem afetar alguns destes mecanismos de emissão de ruído.

2.4.1 Propagação do ruído rodoviário

Para uma caracterização completa do efeito da poluição sonora das infraestruturas rodoviárias e do desempenho acústico das superfícies dos pavimentos nelas utilizado, deve ter-se em atenção, para além os mecanismos de geração, a propagação do ruído rodoviário (Licitra, et al., 2009).

Um fator importante a ter em conta, quando se trata da propagação do ruído a partir de uma fonte localizada, é a distância a que a fonte se encontra do recetor. À medida que a distância aumenta, o nível de ruído diminui.

O ruído que provém do fluxo de tráfego atua de forma diferente ao descrito anteriormente. Neste caso, o ruído deve-se a um grande número de fontes espaçadas ao longo da estrada. Logo, este ruído é classificado como fonte linear, uma vez que o ruído é transmitido ao longo de todo o comprimento da estrada.

Com o aumento da distância à fonte linear, há uma diminuição do nível sonoro. Essa diminuição é originada de maneira diferente caso exista uma única fonte localizada. Isso deve-se ao facto de haver uma contribuição superior do ruído proveniente das fontes, ao das fontes individuais que estão mais próximos. Hanson, em 2005, conclui que, para uma fonte linear, ao duplicar a distância, resulta uma redução do nível de ruído em 3 dB(A), em vez de 6 dB(A).

Assim, se um ponto se encontra a uma distância de 3 metros do centro da fonte de ruído da estrada e registrar um nível de ruído de 85 dB(A), um ponto localizado a 9 metros da berma da estrada obtém um nível de ruído de 82 dB(A). A Figura 8 ilustra este facto (Hanson, et al., 2005).

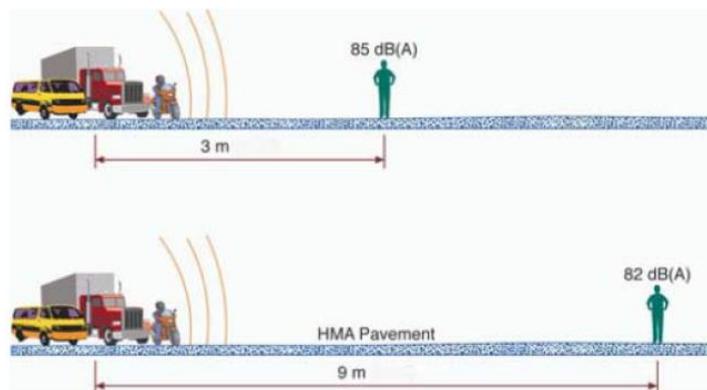


Figura 8 - Efeito da distância sobre uma linha de fontes de ruído situada ao longo de uma superfície pavimentada (Hanson, et al., 2005)

Quando o volume de tráfego diminui para metade, o nível de pressão sonora poderá diminuir em 3 dB. Quando uma pessoa sente, subjetivamente, que há uma redução de 50% do ruído, significa que o nível de pressão sonora terá diminuído aproximadamente 10 dB, o que seria equivalente a uma redução do tráfego em 90%. Na Figura 9 ilustra-se estas relações.

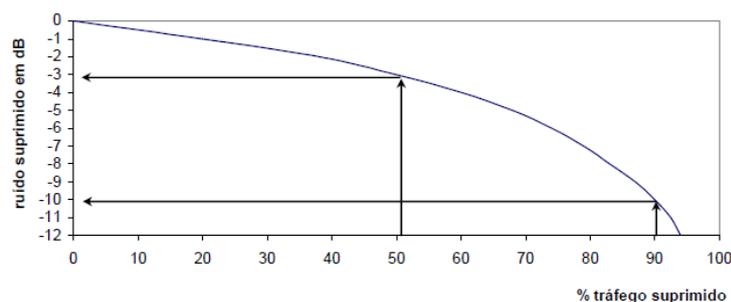


Figura 9 - Decréscimos do nível de pressão sonora função do decréscimo de volume (Raitanen, 2005)

2.4.2 Métodos de avaliação do ruído pneu-pavimento

Para a comparação do desempenho acústico de superfícies de estradas, existem vários métodos que têm vindo a ser utilizados, baseados na medição do ruído pneu-pavimento (Freitas, 2012).

- O método da proximidade imediata (*Close ProXimity method*, CPX) (ISO/DIS11819-2, 2012);
- O método estatístico de passagem (*Statistical Pass-By method*, SPB) (ISO11819-1, 1997), do qual deriva o método da passagem controlada (*Controlled Pass-By method*, CPB)

O método de CPX é executado de acordo com a Norma ISO/DIS 11819-2: 2012: “Acoustics – Measurement of the influence of road surfaces on traffic noise – Part 2: Close –proximity method”.

Este método pode ser realizado de duas formas diferentes:

- Utilizando um atrelado normalizado, puxado por um veículo comum;
- Os microfones são colocados junto a uma roda do próprio veículo.

Para a medição do ruído é utilizado um atrelado de teste normalizado (puxado por um veículo comum) onde são colocados pneus de ensaio e um ou mais microfones junto do pneu. O atrelado possui um “compartimento”, condicionado acusticamente, que protege o microfone de ruídos parasitas (o ruído aerodinâmico e o ruído do tráfego rodoviário normal da via) (ISO/DIS11819-2, 2012).

Este método tem vantagens, que ajudam na escolha do método a utilizar, mas também desvantagens.

Vantagens (Haider, et al., 2006):

- Pode ser utilizado em troços de estudo longos, medindo a emissão dos níveis de ruído de um troço completo e não apenas de um ponto;
- Isolado do ruído de fundo e do som que possa ser refletido, colocando os microfones protegidos a poucos decímetros do pneu e da superfície da estrada, qualquer som perturbador, como a passagem de outros veículos ou outros sons refletidos, normalmente esses sons são 10dB inferiores à onda de som direto;

- Não depende do fluxo de tráfego, fluindo livremente, desde que seja mantida a velocidade de referência;
- Prático e de custo relativamente baixo, as medições podem ser efetuadas de forma bastante eficientes, estando o equipamento sempre disponível e apto para avaliar longas distâncias rapidamente. Não há necessidade de criar secções de teste.

Desvantagens (Haider, et al., 2006):

- O ruído motor não interfere nas medições, medindo só os níveis de pressão sonora proveniente do ruído entre o pneu e o pavimento da estrada. Não representa realmente o que uma pessoa está a ouvir.
- Em camiões, só é válido para camiões definidos como leves.

Este método é aplicado de modo contínuo e à velocidade de circulação do tráfego, fazendo com que a medição de um nível equivalente de ruído seja numa base espacial e não temporal, como é habitual fazer-se, na avaliação da qualidade funcional dos pavimentos. Deve se ter em atenção a presença do vento e a passagem de outros veículos, não pertencente ao estudo, que estejam a circular. Este método tem o benefício de não causar transtorno no tráfego da estrada em estudo (McDade, et al., 2012).

No ensaio SPB, para a medição dos níveis máximos de pressão sonora, são utilizados alguns dos veículos que circulam no trecho escolhido da estrada, em condições normais de circulação. Este método tem como desvantagens a sua aplicabilidade em estradas com elevado volume de tráfego, pois os registos com interferência de outros veículos não são válidos, a dificuldade em encontrar um troço de estrada em reta e sem inclinações acentuadas (Antunes, et al., 2008).

O método da passagem controlada (CPB) deriva do método SPB, estes são efetuados da mesma maneira, existindo uma diferença, no CPB os veículos em estudo são selecionados, sendo ainda controladas algumas condições como a velocidade, o tipo de pneu, a mudança engrenada no veículo e o número de passagens (Inácio, et al., 2012). Tendo como vantagem principal um maior controlo do ensaio, relativamente às

velocidades praticadas, acelerações ou desacelerações indesejadas, e o estado dos pneus (Inácio, et al., 2012).

A avaliação do ruído deve-se complementar com outros ensaios de caracterização da superfície como é o caso do estudo da textura, amortecimento e da absorção sonora.

2.5 Fatores que influenciam o ruído rodoviário

Existem variados fatores que afetam o ruído rodoviário, estando eles divididos em 4 grandes grupos.

- Veículos (carros, caminhões, motos);
- Superfície da estrada;
- Clima;
- Comportamento dos condutores na condução.

2.5.1 Veículos

O ruído produzido pelos veículos pode ser influenciado pelo tipo de veículo, o tipo de pneu que é utilizado e a sua pressão e a velocidade de circulação, estando este fator aliado ao comportamento dos condutores na condução. O tipo de veículo é um fator importante para a geração de ruído, estando relacionado com a idade do veículo, o estado da carroçaria, a transmissão, os travões, o escape, a suspensão e mais constituintes do veículo.

Sandberg, em 1980 demonstrou que à medida que a velocidade do veículo aumenta, o ruído do pneu também aumenta de forma não-linear. Em 2001, fez uma pesquisa em que concluiu que nos veículos ligeiros e para todas as velocidades de mudanças da embraiagem, exceto a primeira velocidade, o ruído da interação do pneu com o pavimento, supera o ruído do motor (Sandberg, et al., 2002).

Na prática, existem vários estudos, todos com as mesmas conclusões, Sandberg (2002), disse que, em veículos ligeiros, a uma velocidade constante, o ruído da interação pneu/pavimento prevalece sempre, mesmo que as velocidades sejam baixas, consideradas no intervalo entre 30 e 50 km/h, e perante congestionamentos em meios urbanos,

enquanto que, Bendtsen e Andersen (2005), e Sanz (2006), concluem que o ruído da interação pneu/pavimento, domina para velocidades acima dos 40 km/h e acima dos 60 km/h, respetivamente, não sendo influenciado pelo ruído do motor.

Em relação aos veículos pesados, é gerado um ruído em circunstâncias diferentes, o ruído da interação do pneu com o pavimento predomina com a condução acima dos 50 km/h, até aí o ruído do motor é o que prevalece (IA, 2004). Segundo Bendtsen e Andersen, em 2005, para camiões e autocarros, a interação entre o ruído do motor e o ruído pneu/pavimento ocorre a velocidades mais elevadas, estando entre os 60 e os 70 km/h.

O ruído pneu-pavimento aumenta de forma aproximadamente logarítmica com a velocidade, ou seja, numa escala logarítmica o ruído tem um aumento linear com a velocidade (Wayson, 1998)

A Figura 10 mostra o aumento dos valores de $L_{máx}$, obtidos pelo método CPB, para uma variação da velocidade entre os 50 e os 110 km/h (velocidades mínima e máxima praticadas no ensaio), para quatro tipos de veículos ligeiros, num trecho de mistura betuminosa rugosa com betume modificado, com elevado conteúdo de borracha (Antunes, et al., 2008).

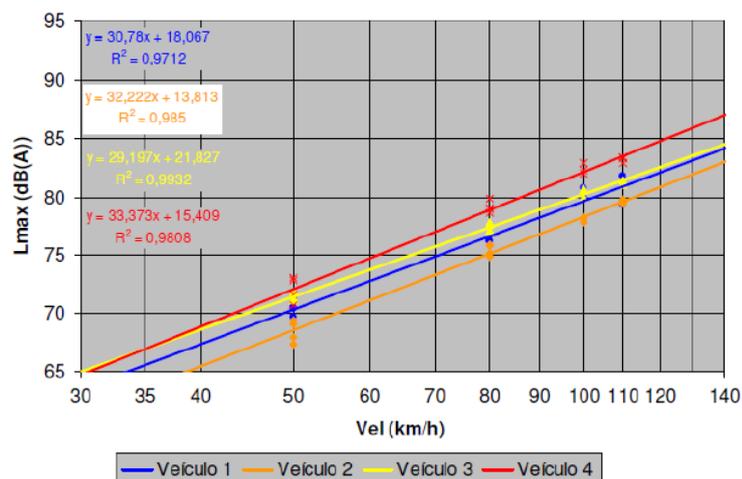


Figura 10 – Variação dos valores de $L_{máx}$, para quatro veículos diferentes, com o aumento da velocidade (Antunes, et al., 2008)

Sendo o pneu uma parte determinante dos veículos para o ruído pneu-pavimento, as características mais importantes são a carga, a pressão de ar do pneu, a idade, a estrutura, a rigidez da borracha, o relevo, o desgaste e a sua geometria, isto é, o seu diâmetro exterior e da jante, a largura e altura, e o desenho da escultura do piso ou da banda de rolamento (Freitas, et al., 2008).

Um dos parâmetros com maior influência no ruído é o desenho da escultura do pneu, uma vez que intervém em todos os mecanismos de geração de ruído, permitindo obter uma redução do ruído através da redução das vibrações e do bombeamento de ar (Sandberg, et al., 2002). A profundidade das suas ranhuras e as vibrações do pneu afetam o ruído gerado pela sua interação com o pavimento. As vibrações, quando criadas, têm uma forma complexa nas direções radiais, tangenciais e axiais. Essas vibrações são transportadas para a parede lateral do pneu que funciona como “placa de som” emitindo assim o som (Santos, 2007).

Na Figura 11 está representada a estrutura do pneu, com todos os seus constituintes.

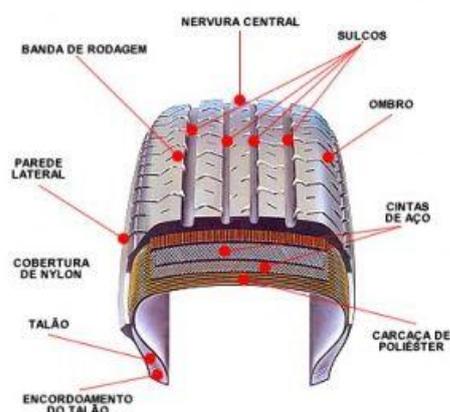


Figura 11 - Estrutura do pneu (Adaptado de <http://www.renaultclube.com/tudo-sobre-pneus/>)

Um piso de pneu de baixo ruído permite que o ar escape por entre as ranhuras do piso assim que entra em contacto com a superfície do pavimento, por sua vez, os pneus mais ruidosos não permitem a libertação do ar com tanta facilidade, aumentando assim o ruído de bombeamento. Por esta razão os pneus mais desgastados provocam mais ruído, devido à diminuição da profundidade das ranhuras (Sandberg, et al., 2002).

Dependendo do tipo de superfície em causa, a otimização das propriedades dos materiais constituintes do pneu pode também reduzir o ruído, resultando numa redução até 2 dB(A). São exemplos de otimização o aumento da espessura da borracha de base e da cinta e o reforço das paredes laterais (Pucher, et al., 2006).

Os materiais que constituem o pneu também podem influenciar o ruído da interação do pneu com o pavimento. Um desses materiais a estudar neste trabalho é a sua dureza, embora num dos projetos SILVIA, se tenha concluído que o aumento da dureza do pneu não resultou em alterações do ruído para os dois valores de dureza de pneu testados (Puncher, et al., 2006)

2.5.2 Superfície do pavimento

O tipo de pavimento é um dos fatores importantes que influenciam o ruído pneu/pavimento. Um pavimento rodoviário é uma estrutura constituída por diferentes camadas de espessura finita (sistema multiestratificado), apoiando-se na fundação constituída pelo terreno natural (maciço semi-indefinido, potencialmente com dois horizontes diferenciados). Assim, existem vários tipos de pavimentos, organizados em 5 grupos diferentes, cada um com as suas características, sendo os três primeiros os mais usuais (Ferreira, 2010):

- Pavimentos Flexíveis;
- Semi-rígidos;
- Pavimentos Rígidos;
- Pavimentos Modulares;
- Pavimentos Poro-Elásticos.

Os pavimentos flexíveis são aqueles que sofrem uma deformação elástica significativa sob o carregamento aplicado, logo a carga distribui-se em quantidades idênticas por todas as camadas. Este tipo de pavimento é constituído inicialmente pelo solo de fundação, de seguida uma camada de sub-base granular, uma camada de base granular, uma camada de regularização e por fim uma camada de desgaste, sendo esta a camada exposta ao ar. De seguida está uma ilustração onde se pode verificar melhor essas diferentes camadas (Ferreira, 2010). Em Portugal é mais usual este tipo de pavimentos.

Os constituintes da camada de desgaste podem variar em várias situações, AC14, drenante ou de betume modificado por adição de borracha.

As misturas em betão betuminoso do tipo AC14 são utilizadas na maior parte dos pavimentos rodoviários como camada de desgaste, sendo consideradas misturas “típicas”.

A camada em betão betuminoso drenante foi desenvolvida para reduzir a água à superfície e o efeito de projeção de água em estradas de alta velocidade, durante períodos de pluviosidade intensa. No entanto, verificou-se que este tipo de superfície oferecia igualmente vantagens do ponto de vista acústico. Subsequentemente foram realizadas experiências com betão betuminoso poroso em muitos outros países europeus e noutras partes do mundo (FEHRL, 2006).

Os pavimentos betuminosos de borracha consistem em camadas porosas realizadas com material proveniente de pneus reciclados. A sua porosidade está entre os 20 e os 40%. Embora a sua eficácia acústica seja importante, apresentam problemas de resistência e durabilidade (FEHRL, 2006).

Quanto aos pavimentos semi-rígidos, estes possuem uma constituição idêntica aos pavimentos flexíveis e aos pavimentos rígidos, diferenciando-se apenas na camada de base e permanecendo a camada de desgaste e a camada de regularização semelhantes aos anteriores. Neste caso, a camada de base é constituída por um material granular estabilizado com um ligante hidráulico, utilizando geralmente em betão pobre. As camadas de desgaste podem ser de vários tipos, em betão betuminoso denso, porosas e delgadas (Ferreira, 2010).

Os pavimentos rígidos são aqueles em que o revestimento tem uma elevada rigidez comparado com as camadas inferiores, logo absorve praticamente todas as tensões provenientes do carregamento aplicado. Este tipo de pavimento é constituído por uma laje de betão de cimento, sendo esta apoiada numa camada de sub-base, constituída por material granular ou não, preferencialmente solidificada com um ligante hidráulico (igual aos pavimentos semi-rígidos).

Um pavimento modular é constituído por uma primeira camada porosa com espessura a variar entre 4 e 6 cm, colocada sobre uma camada de betão, em que no seu interior são colocados ressoadores de Helmholtz. O conceito de pavimento modular, assenta no facto de este ser constituído por diversas camadas, cada uma desempenhando uma determinada função, nomeadamente, a redução de ruído, a oferta de boas características de permeabilidade, entre outras. Este pavimento tem um bom desempenho acústico, nomeadamente, o "*Modieslab*", o qual oferece uma redução de 7 dB (A) no nível de ruído, em comparação com uma superfície de referência de betão betuminoso holandesa (FEHRL, 2006a).

Os pavimentos poro-elásticos apresentam uma espessura entre 3 e 6 cm. São constituídos por uma mistura betuminosa com uma elevada percentagem de borracha, conferindo desta forma, um bom comportamento acústico para as médias e altas frequências (Bendsten, 2007). Além do bom comportamento sonoro, estes pavimentos apresentam boas características de comodidade e de segurança (aderência e drenagem).

Como desvantagens, os pavimentos poro-elásticos não se adequam a meios urbanos, visto que os poros ficam parcialmente obstruídos aumentando desta forma o ruído, verificando-se também uma reduzida durabilidade devido ao envelhecimento precoce do ligante (Bendsten, 2007).

Todos os tipos de pavimento, que foram referidos anteriormente, reúnem um conjunto de características que determinam o ruído. Sendo essas a textura, a cor, a irregularidade, a porosidade, a rigidez, absorção sonora, desgaste e a presença da água no pavimento e a sua idade (Freitas, et al., 2012), sendo as características de maior influência acústica a textura, a porosidade, a absorção sonora e a impedância mecânica (Freitas, et al., 2008).

A textura do pavimento é um dos fatores que determina a geração do ruído da interação pneu/pavimento, particularmente nas gamas da macrotextura e da megatextura. Quando os comprimentos de onda se encontram entre 10 mm e 500 mm (macro e megatextura, respetivamente), o ruído vai aumentando significativamente à medida que a amplitude da textura aumenta. Ou seja, quanto maior a amplitude da textura mais ruído gera (Freitas, et al., 2012).

A comodidade, a estabilidade da condução, as cargas dinâmicas, o desgaste do veículo e o ruído proveniente da interação pneu/pavimento são condicionados pela megatextura (comprimentos de onda entre os 50 e os 500 mm). Este tipo de textura é a que contribui mais para elevados níveis de ruído pneu/pavimento, desenvolvendo-se através de orifícios, buracos, ondulações e desníveis da superfície dos pavimentos. Com isso, pode-se concluir que se trata de uma característica pouco desejável, visto que interfere diretamente no atrito e no ruído. A Figura 12 mostra como a megatextura se faz parecer nos pavimentos.

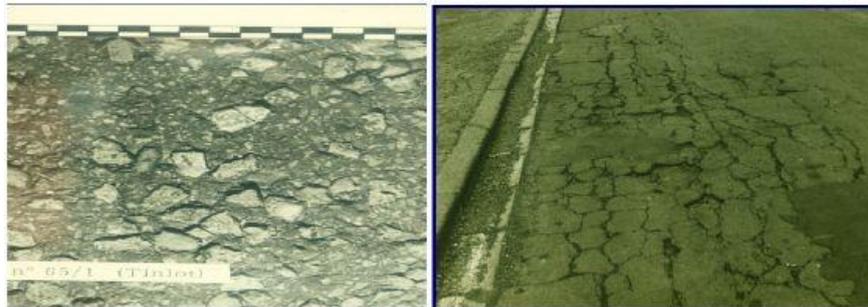


Figura 12 – Megatextura (Descornet, et al., 2006)

A irregularidade é designada por *unevenness* ou *roughness* na terminologia anglo-saxónica e engloba todas as anomalias e defeitos da camada de desgaste, cujo comprimento de onda seja superior a 0,5 m. Avalia-se a nível transversal e longitudinal. A regularidade longitudinal é uma irregularidade geométrica da superfície do pavimento com efeitos reais, como vibrações nos veículos. A regularidade transversal associa-se ao período de utilização do pavimento. Ao longo da sua vida útil, sofre deformações e degradações que se estendem até às rodeiras. Assim, se avalia a profundidade máxima das rodeiras (Bendsten, 2007). É notório que quando se circula num pavimento com irregularidades o ruído é maior do que num pavimento com poucas irregularidades.

A porosidade representa os vazios existentes entre as partículas do pavimento, que permitem a drenagem do pavimento e a drenagem do ar que se instala nas ranhuras do pneu. Obtém-se, portanto, uma melhor absorção sonora, que se traduz na redução da ação refletora acústica do pavimento e atenua a propagação das ondas na superfície deste. A porosidade também reduzirá o efeito amplificativo do efeito pavilhão que existe no espaço entre a curvatura de pneu e o plano da superfície de via (Bendsten, 2007).

Algumas dessas características influenciam diretamente a absorção sonora da superfície, como é o caso da espessura da camada, da granulometria e da porosidade. Para se fazer com que haja uma redução máxima de ruído produzido pelo tráfego, é importante ajustar-se as propriedades da superfície da estrada, que determinam a absorção do som, com as características da composição do tráfego (Freitas, et al., 2012).

Quanto mais porosa é a superfície da estrada, menos ruído é gerado pelo bombeamento do ar, aumentando assim a absorção acústica e conseqüentemente reduzindo o efeito de pavilhão. O aumento da espessura da camada ou o aumento do índice de vazios tendem a reduzir as frequências onde ocorrem os principais efeitos de absorção sonora (FEHRL, 2006).

Em função de um conjunto de condicionantes já referidos que influenciam diretamente o ruído devido ao rolamento do pneu-pavimento, a quantidade de água pode conduzir a um aumento de ruído até 15 dB(A) (Freitas, et al., 2006).

Em condições molhadas, a água pode processar o ruído através das seguintes ações (Bendsten, 2007):

- Deslocamento de água na frente da área de contacto (projeção de água);
- Compressão de água nas ranhuras dos pneus e conseqüente projeção;
- Contacto entre a água projetada (em forma de jacto ou de gotas) e o corpo do veículo;
- Impacto do relevo dos pneus na superfície da água;
- Quebra de ligação entre a borracha dos pneus e a água.

Tendo em conta que neste estudo se abordará em particular a impedância mecânica e acústica, a seguir aborda-se com mais detalhe estes dois fatores que determinam o ruído.

2.5.3 Clima

A temperatura, a precipitação e o vento existentes no local, no momento da medição do ruído, influenciam o seu valor.

A velocidade do vento, a sua direção e a temperatura ambiente podem causar reflexão da onda de propagação do ruído, provocando desta forma uma alteração nos níveis de ruído até distâncias superiores a 100 m da fonte. A temperatura pode ainda causar refração no trajeto do ruído (Wayson, 1998). A velocidade do vento está relacionada com o ruído aerodinâmico, tendo este um maior efeito em veículos ligeiros que circulam a velocidades superiores a 120 km/h e em veículos pesados a partir de 90 km/h (Freitas, et al., 2006), não se devendo proceder à avaliação do ruído quando este tiver uma velocidade superior a 5 metros por segundo (ISO11819-1, 1997). Geralmente, velocidades do vento mais reduzidas ou o aumento da temperatura conduzem a uma redução do nível de ruído (Santos, et al., 2006).

A medição do ruído da interação do pneu com o pavimento molhado só se deve efetuar em casos de estudo específicos. A quantidade de água presente no pavimento pode conduzir a um aumento do ruído até 15 dB(A) (Descornet, et al., 2000). Adriana Santos (2007), após o estudo do ruído da interação do pneu com o pavimento, em piso molhado, com auxílio do método estatístico de passagem (SPB), concluiu que o pavimento drenante foi o que apresentou níveis de ruído inferiores, em relação ao método CPX. O pavimento drenante associado a veículos equipados com pneus de escultura otimizada, proporcionou reduções dos níveis de ruído na ordem dos 8 dB(A), para condições molhadas, a velocidades entre os 75 e os 90 km/h.

Quanto à temperatura, é possível ajustar-se o ruído medido, tendo em conta uma temperatura de referência, em função do tipo de camada, utilizando a metodologia recomendada, por exemplo, em Anfosso-Lédée, F. & Pichaud, Y (2005).

De uma forma geral, quando há um aumento da temperatura, o ruído diminui. Este aspeto é analisado com detalhe mais a diante.

2.6 Impedância Mecânica

A variação do ruído com a impedância mecânica, da camada superficial de um pavimento rodoviário tem vindo a ser estudada, embora os resultados não sejam muito esclarecedores. Nesses estudos, observou-se que quanto mais rígida é a superfície do pavimento mais ruidosa se torna (Cesbron, et al., 2005).

Geralmente a impedância mecânica das estradas é muito superior à da borracha na base do pneu. Diminuindo a impedância mecânica das estradas tende-se a reduzir as forças de impacto do bloco, na base, transmitidas ao pneu, que por sua vez, irá reduzir os níveis de vibração e a geração de ruído (FEHRL, 2006).

A relação entre a impedância mecânica da camada superficial de um pavimento rodoviário, vulgarmente designada por rigidez, e o ruído tem vindo a ser objeto de estudo, embora os resultados obtidos não sejam muito esclarecedores.

Observou-se entretanto que quanto mais rígida é a superfície mais ruidosa se torna. Houari, em 2004, confirma que o nível de ruído sobre uma superfície rígida (por exemplo, em betão de cimento) é superior ao nível de ruído das superfícies flexíveis (em betão betuminoso). A rigidez do pavimento influencia significativamente a sua resposta dinâmica. Porém, influencia pouco a resposta do pneu, levando a que o efeito global da rigidez no ruído seja muito limitado.

Por sua vez, as conclusões relativamente às superfícies em misturas betuminosas com borracha reciclada (dos pneus) são ambíguas. Por um lado, não se registou que ligantes com pó de borracha apresentassem um nível de ruído mais baixo devido a uma reduzida rigidez (Hamet, et al., 2000). Por outro lado, o projeto SILVIA (SilendaVia – Sustainable Road Surface for Traffic Noise Control) demonstrou que a rigidez de uma camada superficial influencia positivamente o ruído pneu/pavimento quando o material que a constitui tem uma rigidez comparável à do pneu (Descornet, et al., 2006).

Ainda neste âmbito, Biligiri, em 2006, mostra que parte da redução do ruído observada em laboratório pode ser explicada através das propriedades viscoelásticas das misturas, nomeadamente o ângulo de fase, que por sua vez se relacionam com o fator de amortecimento e este com o ruído pneu-pavimento. Deve-se recordar que, em termos estruturais, as misturas betuminosas são caracterizadas pelo seu módulo de deformabilidade e ângulo de fase.

O nível de ruído existente numa superfície rígida (betão de cimento) é superior ao nível de ruído das superfícies flexíveis (betão betuminoso). A rigidez do pavimento influencia

expressivamente a sua resposta dinâmica. Contudo, pouco influencia a resposta do pneu, levando a que o efeito global da rigidez seja muito limitado (Santos, 2007).

Em relação aos pavimentos com misturas betuminosas com borracha reciclada, as conclusões são ambíguas. Não se registou que os ligantes com pó de borracha apresentassem um nível de ruído mais baixo, devido a uma reduzida rigidez (Hamet, et al., 2000). Contudo, o projeto SILVIA, em 2006, demonstrou que a rigidez de uma camada superficial influencia positivamente o ruído pneu/pavimento, quando o material que a constitui tem uma rigidez comparável à do pneu. Atualmente existe um projeto de investigação que explora este conceito, com resultados muito promissores, como é o caso do projeto PERSUADE.

Uma alternativa de redução do ruído de tráfego passa por melhorar as propriedades acústicas e mecânicas da camada superficial, que em conjunto com uma melhoria das propriedades de amortecimento da camada de regularização, poderão proporcionar um desempenho acústico do pavimento mais eficiente (Freitas, et al., 2012).

O amortecimento da superfície de um pavimento serve para determinar a capacidade da estrutura em dissipar a energia. Pode ser obtido, também através do ensaio da impedância mecânica, a partir da função de resposta em frequência entre a força de impacto, aplicada por um martelo, numa camada do pavimento e a resposta da estrutura em termos da sua velocidade. A relação de amortecimento, associada à frequência de ressonância de cada modo de vibração, pode ser calculada através do método de largura de banda (Ewins, 2000).

O amortecimento, ou atrito interno, é uma das propriedades mais sensíveis dos materiais e das estruturas, tanto em escala macro como microscópica, sendo particularmente sensível à presença de fendas e micro-fendas. É o fenómeno pelo qual a energia mecânica de um sistema é dissipada (principalmente pela geração de calor e/ou de energia). O amortecimento determina a amplitude de vibração na ressonância e o tempo de persistência da vibração depois de cessada a excitação (Cassolino, et al., 2010).

A temperatura também influencia o amortecimento dos pavimentos. O aumento da temperatura leva a um aumento do amortecimento, sendo mais significativo a partir dos

20°C. De entre todas as misturas estudadas, Ana João (2013) conclui que a que obteve menores percentagens de amortecimento foi com PEAD (mistura com plásticos), estando relacionado com a dureza do plástico utilizado na mistura. A mistura com argila expandida, com maior volume de vazios e betume modificado com SBS (aditivo de Estireno-butadieno-estireno, foi a que obteve melhores resultados a nível de amortecimento para todos os parâmetros avaliados. Ao contrário do que era expectável a mistura com borracha obteve um comportamento muito semelhante ao da mistura convencional.

2.7 Impedância Acústica

O som propaga-se através de ondas sonoras. Quando essa onda entra em contacto com o pavimento, o som é refletido, absorvido e transmitido pelo material que compõe o pavimento. Na Figura 13 está representado esse facto (a absorção, a reflexão e a transmissão).

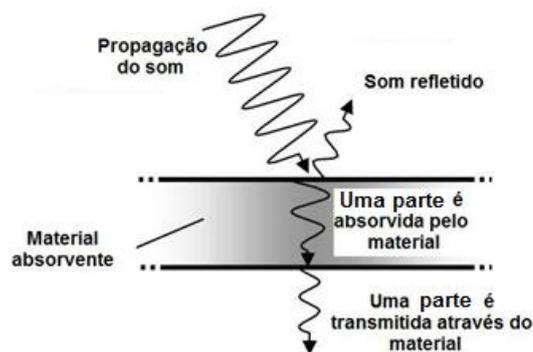


Figura 13 - Ondas refletidas, absorvidas e transmitidas (adaptado de (Tijs, 2013))

O som reflete quando existe uma diferença de impedância entre dois meios. Além disso, o som incidente é parcialmente absorvido ou transmitido (Tijs, 2013).

- O coeficiente de reflexão calculado, tendo em conta a pressão do som, é a razão entre a pressão do som do que é refletido e a pressão sonora do que é recebido. O valor está entre zero e um (Tijs, 2013).
- O coeficiente de absorção, também está entre zero e um, mas em vez de utilizar a relação de pressões sonoras, é utilizado o rácio da intensidade das

ondas sonoras que são absorvidas, o que é igual à pressão sonora ao quadrado para uma onda no campo livre (Tijs, 2013).

De um modo geral, o coeficiente de absorção depende da frequência do som e do ângulo de incidência da onda do som e é geralmente avaliado por incidência de ondas planas (Haider, et al., 2006).

O ruído propaga-se mais rapidamente numa superfície que reflete, como é o caso de um pavimento rodoviário, do que numa superfície vegetal, devido a este ter uma maior absorção sonora (IA, 2004).

A impedância acústica é influenciada pelas características da superfície do pavimento, tais como a espessura da camada, a resistividade e a porosidade. Além disso, a absorção é influenciada pelo ângulo de incidência das ondas sonoras sobre a superfície. Para se alcançar a redução máxima de ruído produzido pelo tráfego é importante ajustar-se as propriedades de absorção de som com as características da composição de tráfego. A medição da absorção sonora é fundamental na fase de concepção, para otimizar esta característica do material e na fase de exploração para avaliar o desempenho acústico ao longo do tempo (Inácio, et al.).

2.8 Influência da Temperatura

A temperatura é um fator importante na avaliação do ruído. Para além da temperatura do ar aquecer o pavimento, a interação do pneu com a superfície da estrada também gera calor e por sua vez som, por esse motivo, tanto o pneu como a superfície do pavimento, adquirem uma certa temperatura. Isso faz com que existam três diferentes tipos de temperatura a ter em atenção na avaliação do ruído, proveniente da interação do pneu com o pavimento, a temperatura do ar, a do pavimento e a do pneu (Santos, 2007).

Quanto à temperatura do ar, esta comporta-se de maneira diferente consoante a hora do dia. Quando as regiões junto ao solo se encontram mais aquecidas, apresentando menores temperaturas à medida que se sobe em altitude, o ar quente proveniente do pavimento sobe, originando um movimento das ondas sonoras, que neste caso, são projetadas a partir da fonte para cima em todas as direções, formando uma zona de sombra, como se pode

verificar na Figura 14 a). A situação inversa ocorre aquando na presença de um gradiente de temperatura positivo, tendendo a intensificar o som próximo ao solo. Isto ocorre porque, quanto maior a temperatura, maior a velocidade de propagação da onda, como se verifica na Figura 14 b) (Lamancusa, 2009).

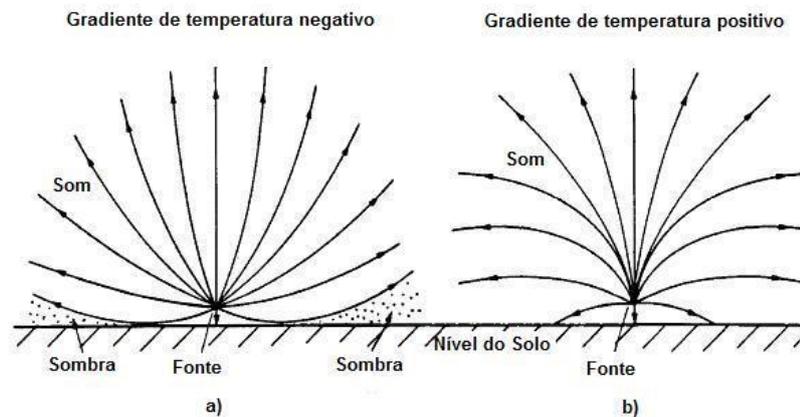


Figura 14 - Refração do som com os gradientes de temperatura: a) Gradiente de temperatura negativo; b) Gradiente de temperatura positivo

No entanto, um fator variável como a temperatura da superfície do pavimento pode tornar-se determinante no comportamento do som final proveniente da interação do pneu e com o pavimento. A temperatura do pavimento está diretamente relacionada com a temperatura do ar. Em alguns locais, as diferenças de temperatura podem ser elevadas, no verão a temperatura da superfície da estrada pode estar acima dos 50 °C e no inverno a temperatura ronda os 0 °C. Além disso, a temperatura dos pneus em movimento, ao entrarem em contacto com o pavimento, aumenta, devido aos diferentes mecanismos de atrito, até atingir um valor constante de acordo com o tipo de pneu, da temperatura do pavimento, da textura e do polimento (Bueno, et al., 2011).

Vários projetos, a seguir referidos, para além de definirem o coeficiente de correção da temperatura, mostram que o aumento da temperatura conduz a uma redução do nível de ruído.

2.8.1 Projeto de Fabienne Anfosso-Lédée e Yves Pichaud

O primeiro trabalho divulgado, que relaciona o ruído pneu/pavimento com a temperatura, foi desenvolvido no “Laboratoire Central des Parts et Chaussées” (LCPC), em Nantes, na década de 80.

Foram utilizados dois tipos de pneus de Verão, um mais ruidoso (Tipo A) e um menos ruidoso (Tipo B). A dureza da borracha do pneu foi 76.4, para o Tipo A e 79.5 para o Tipo B. As medições de ruído foram realizadas em sete pavimentos, classificados como densos e drenantes, incluindo em asfalto e cimento, apresentados na Tabela 1. Foi utilizado um veículo de ensaio a velocidade constante de 90 km/h. A medição do ruído foi realizada através do método CPB, descrito anteriormente. Para cobrir uma gama extensa de temperatura, 0 °C a 30 °C, foi efetuada a medição da temperatura do pavimento, do ar e dos pneus (Anfosso-Lédée, et al., 2007).

Tabela 1 - Tipos de pavimento utilizados

Tipo de Pavimentos	Espessura (cm)
Betão betuminoso denso (DAC) 0/10	6.2
Betão betuminoso poroso (PAC) 0/10	4
Betão betuminoso muito delgado (VTAC) 0/10	2.5
Revestimentos Superficiais	
Superfície áspera (SD) 8/10	
Superfície fina e suave (SSD) 0.8/1.5	
Cimento	
Bloco de cimento (CC)	12
Bloco de cimento poroso (PCC)	12

Conclui-se que existem duas equações, uma para a determinação da temperatura do pavimento e outra do pneu. As Equações 3 e 4 representam essa relação, entre essas temperaturas e a temperatura do ar.

$$T_{pavimento} (^{\circ}C) = 1.7T_{ar} - 4.5 \quad (3)$$

$$T_{pneu} (^{\circ}C) = 1.05T_{ar} + 15.8 \quad (4)$$

Em França é empregue a Equação 5, para normalizar os níveis de ruído medidos para a temperatura de referência de 20 °C, em que o $L_{Amáx}$ é o nível de ruído máximo medido, T

é a temperatura do ar em graus Celsius e α é o coeficiente de temperatura (Tabela 2) (Anfosso-Lédée, et al., 2007).

$$L_{A_{máx}}(20^{\circ}C) = L_{A_{máx}}(T) - \alpha (T - 20) \quad (5)$$

Tabela 2 - Fator de correção (Anfosso-Lédée, et al., 2007)

Tipo de Pavimento	α
SD (8/10 e 0.8/1/5)	1.8
DAC 0/10	1.6
VTAC 0/10	1.7
PAC 0/10	1.4
PCC	1.7
CC	2.2
Para todos os tipos	1.7

2.8.2 Projeto HARMONOISE

O projeto Harmonoise Accurate and Reliable Methods for the EU Directive on the Assessment and Management of Environmental Noise, designado como HARMONOISE, teve como principal objetivo o desenvolvimento de modelos de previsão de ruído para tráfego rodoviário e ferroviário, para utilização na produção de mapas estratégicos de ruído nos estados membros da União Europeia (HARMONOISE, 2003).

O projeto Harmonoise desenvolveu métodos computacionais de previsão de níveis de ruído ambiental provocados pelo tráfego rodoviário e ferroviário. Este estabeleceu relações entre alguns parâmetros, como o nível de ruído provocado pelo contacto pneu/pavimento, ruído de propulsão, a influência da temperatura, humidade e idade do pavimento, entre outros (HARMONOISE, 2003).

Todos os dados padrão referem-se a uma condição de referência: velocidade constante, 20°C e a média do ruído obtido nos pavimentos de betão betuminoso denso e SMA (Stone Mastique Asphalt) com dimensão máxima do agregado de 11 mm em ambos os casos e com 2 anos ou mais mas nunca no fim da sua vida útil (HARMONOISE, 2003).

No que diz respeito ao modelo de correção do ruído, devido à temperatura, este depende da categoria dos veículos apresentada.

O tipo de veículo utilizado no ensaio é importante, devido às suas características. A Tabela 3 demonstra as categorias utilizadas no ensaio. Na Tabela 4 pode-se verificar os tipos de pavimentos estudados neste projeto.

Tabela 3 - Resumo das categorias de veículos a serem utilizados

Tipos principais	Nº	Exemplos de tipos de veículos	Notas
Veículos Ligeiros	1a	Carros	2 eixos (máx. 4 rodas)
	1b	Carrinhas, pick-up, carro+atreladocarro+caravana	2-4 eixos (máx. 2 rodas) por
	1c	Carros elétricos	
	1d	Carros hídricos	
Veículos Pesados Médios	2a	Autocarros	2 eixos (6 rodas)
	2b	Camiões ligeiros e carrinhas pesadas	2 eixos (6 rodas)
	2c	Camiões pesados médios	2 eixos (6 rodas)
	2d	Autocarros "trolley"	2 eixos (6 rodas)
	2e	Linha de baixo ruído	2 eixos (6 rodas)
Camiões Pesados	3a	Autocarros	3-4 eixos
	3b	Camiões pesados	3 eixos
	3c	Camiões pesados	4-5 eixos
	3d	Camiões pesados	≥6 eixos
	3e	Linha de baixo ruído	≥3 eixos
Outros tipos de Pesados	4a	Camiões para construção civil	
	4b	Tratores agrícolas, máquinas, camiões dumper, tanques	
Duas rodas	5a	Motociclos, scooters	Inclui também os motociclos de 3 rodas
	5b	Ciclomotores	

Tabela 4 - Resumo dos vários tipos de pavimento a serem usadas

Superfícies Asfálticas	
DAC	Betão Betuminoso Denso
A	Mastiques Betuminosos Pétreos
OGAC	Mistura Betuminosa Aberta, (vazios: 15-19%)
PAC	Betão Betuminoso Poroso (uma camada), vazios $\geq 20\%$
DPAC	Betão Betuminoso Poroso (camada dupla)
GA	Mastiques betuminosos com gravilha rolada
HRA	Mistura betuminosa cilindrada a quente com gravilha (Hot Rolled Asphalt)
THS	Camada delgada de misturas DAC e SMA
ISO-S	Superfície macia (norma ISO 10844)
ISO-R	Superfície rugosa (norma ISO 10844)
Superfícies com borracha	
DACR	Mistura Betuminosa Densa em borracha (>2% e <20% por peso)
PERS	Superfície Poroelástica ($\geq 20\%$ do peso é borracha)
Revestimentos Superficiais	
SDS	Revestimento Superficial (uma camada)
SDD	Revestimento Superficial (duas camadas)
Betão de Cimento	
CC	Betão de Cimento
CCDG	Betão de Cimento “diamond ground”
EACC	Betão de Cimento com agregado exposto
CCHD	Betão de Cimento com tratamento polvilhado “Hessian”
CCAT	Betão de Cimento com tratamento “Astroturf”
CCTG	Betão de Cimento com ranhuras transversais
CCLG	Betão de Cimento com ranhuras longitudinais
PCC	Betão de Cimento Poroso (uma camada)
Pavimento	
ILCB	Superfície constituída por blocos de cimentos ligados
PS	Pavimento de pedra constituído por blocos retangulares ou quadrados
CS	Calçada (pedras arredondadas)

Neste caso, é utilizado o nível de potência sonora. A partir da Equação 6 é possível corrigir o nível de potência sonora ($L_R(\theta_{ref})$), dependendo do nível sonoro medido ($L_R(\theta)$), da temperatura de referência (20°C) e do coeficiente de temperatura K, que toma os valores expostos na Tabela 5 (HARMONOISE, 2003).

$$L_{WR}(\theta_{ref}) = L_{WR}(\theta) + K(\theta_{ref} - \theta) \quad (6)$$

O nível de potência sonora pode diminuir cerca de 0,1 dB por cada grau de aumento de temperatura do ar, e cerca de 0,06 dB por cada grau de temperatura do pavimento (HARMONOISE, 2003).

Tabela 5 - Coeficientes de Temperatura para diferentes superfícies (HARMONOISE, 2003)

Misturas Betuminosas	
DAC	0.10
SMA	0.06
OGAC	0.05 (se ≤ 1 ano) e 0.06 (se > 1 ano)
	Até 6/11: 0.05 (se ≤ 2 anos) e 0.06 (se > 2 anos)
PAC	Acima de 6/11: 0.04 (se ≤ 2 anos) e 0.06 (se > 2 anos)
DPAC	0.05 (se ≤ 2 anos) e 0.06 (se > 2 anos)
GA	5/8: 0.10 e 8/11: 0.06
HRA	0.06
THS	0.10
ISO-S	0.08
ISO-R	0.12
Superfícies com borracha	
DACR	0.10
PERS	0.06
Revestimentos Superficiais	
SDS	0.12
SDD	0.12
Betão de Cimento	
CC	0.05
CCDG	0.05
EACC	0/8: 0.05 e outros: 0.09
CCHD	0.05
CCAT	0.05
CCTG	0.09
CCLG	0.09
PCC	0.03 (se ≤ 2 anos) e 0.04 (se > 2 anos)
Pavimento	
ILCB	0.06
PS	0.06
CS	0.06

2.8.3 Projeto CNOSSOS

A Comissão Europeia decidiu elaborar um método comum de avaliação do ruído (Cnossos-EU) para ruído rodoviário, ferroviário, aéreo e industrial com o objetivo de melhorar a confiança e a comparabilidade dos resultados entre os Estados Membros. Para este estudo pretende-se reunir as informações referentes ao ruído rodoviário, referindo como método de avaliação do ruído europeu, o HARMONOISE, descrito anteriormente. Os objetivos principais deste método é permitir um coerente, transparente, otimizado e confiável procedimento a tomar nos mapas de ruído estratégicos e planeamento de ação (CNOSSOS, 2010).

Para a consideração do efeito da temperatura no ruído, neste projeto é proposta uma metodologia semelhante à do Harmonoise. Assim, as categorias de veículos selecionadas foram as apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6 - Resumo das categorias de veículos a serem utilizados

	Nº	Exemplos	Categorias de veículos na Homologação EC
Veículos Ligeiros	1	Veículos de passageiros, carrinhas comerciais com peso $\leq 3,5$ ton.	M1 e N1
Veículos Pesados	2	Veículos pesados médios, carrinhas comerciais com peso $> 3,5$ ton., autocarros de turismo, autocarros com 2 eixos e pneus duplos montados no eixo real	M2, M3 e N2, N3
	3	Veículos pesados, autocarros de turismo, autocarros com três ou mais eixos	M2 e N2 com atrelado, M3 e N3
Duas rodas	4	Ciclomotores, triciclos e quadriciclos ≤ 50 cc	L1, L2, L6
		Motociclos, triciclos e quadriciclos > 50 cc	L3, L4, L5, L7

Para calcular o coeficiente corretivo, $\Delta L_{WR,temp}$, em relação ao nível de potência sonora, para determinada temperatura T usa-se a Equação 7. Este fator é negativo para temperaturas superiores a 20°C e positivo para temperaturas inferiores a 20°C . O

coeficiente K depende do tipo de pavimento e da classe de porosidade (Ω). Esta equação é válida para temperaturas do ar entre 5 e 35°C (CNOSSOS, 2010).

$$\Delta L_{WR,temp} = K \times (20 - T) \quad (7)$$

Para um cálculo mais cuidado pode-se consultar as Tabelas 7 e 8. No caso de veículos pesados é assumido que exibe um efeito de temperatura mais baixo no ruído de rolamento. Os coeficientes K para as Categorias 2 e 3 tendem a ser metade dos valores da Categoria 1.

Tabela 7 – Coeficientes de temperatura para diferentes superfícies Categoria 1

Categoria 1	Classe de Porosidade (Ω)		
	$\Omega \leq 5\%$	$5\% \leq \Omega \leq 15\%$	$\Omega \geq 15\%$
Classes de Textura (MPD)			
MPD $\leq 0,5$ mm	0.04	0.06	0.08
$0,5$ mm \leq MPD $\leq 1,5$ mm	0.08	0.07	0.06
MPD $\geq 1,5$ mm	0.12	0.08	0.03

Tabela 8 - Coeficientes de temperatura para diferentes superfícies Categoria 2 e 3

Categoria 2 e 3	Classe de Porosidade (Ω)		
	$\Omega \leq 5\%$	$5\% \leq \Omega \leq 15\%$	$\Omega \geq 15\%$
Classes de Textura (MPD)			
MPD $\leq 0,5$ mm	0.02	0.03	0.04
$0,5$ mm \leq MPD $\leq 1,5$ mm	0.04	0.04	0.03
MPD $\geq 1,5$ mm	0.06	0.04	0.02

Por simplificação pode-se aplicar um coeficiente corretivo K de 0,08 dB/°C para todas as superfícies (CNOSSOS, 2010).

2.8.4 Projeto Suíço

No projeto Suíço, o ruído foi medido através do método de CPX, com dois tipos de pneus de ensaio diferentes (SRTT e Avon AV4) e 12 tipos de pavimentos, Tabela 9. As velocidades escolhidas foram a de 80 km/h e de 50 km/h (Bühlmann, et al., 2011).

Foram escolhidos nove locais de teste, no norte e no centro da Suíça, com base nos critérios seguintes:

- A superfície da estrada foi totalmente exposta à radiação solar durante o dia, enquanto o sombreamento limitado de árvores isoladas e pontes foi tido em conta.
- As superfícies de estrada eram homogéneas e não danificadas.
- O comprimento total de uma secção de medição era de 2 e 10 km.

Foram efetuadas nove séries de medições, 39 estradas avaliadas, utilizados 124 pneus. Na Tabela 9 estão todos os tipos pavimentos avaliados neste estudo, juntamente com a sua gama de conteúdo de vazios e idade.

Tabela 9 - Tipos de pavimento utilizados

Tipo de Pavimento	Índice de vazios	Idade	Nº superfícies de estrada
DAC Betuminoso denso 0/10	2 - 4 %	d	4
DAC Betuminoso denso 0/11	2 - 4 %	c/d	8
DAC Betuminoso denso 0/16	2 - 6 %	d	1
ACMR Betuminoso drenante 8/11	6 - 10 %	c	1
ACMR Betuminoso drenante 4/8	6 - 10 %	b	1
HRA Betuminoso a quente 0/16	2 - 6 %	d	1
MA Mastique asfáltico 0/11	-	c/d	2
MA Mastique asfáltico 0/16	-	d	1
SMA Mastique asfáltico em pedra	2 - 6 %	b/c/d	4
CC Blocos de cimento	-	d	5
PA Asfalto poroso 4/11	18 - 20 %	a	8
Asfalto muito fino 2/4	16 - 20 %	a	3

Idade das categorias: a: < 1 ano; b: 1 – 5 anos; c: 5 – 10 anos; d: > 10 anos

As medições realizaram-se em dias de céu limpo, no final do Verão de 2010, foram iniciadas ao nascer do sol (6h) e foram repetidas continuamente até a temperatura máxima

ser atingida (17h). A temperatura do ar foi medida a alturas diferentes da superfície da estrada (150 cm, 35 cm e 15 cm), variou entre os 10°C e os 30°C. A temperatura do pavimento e do pneu, foram medidas através de sensores de infravermelhos (Bühlmann, et al., 2011).

Todas as temperaturas medidas foram correlacionadas com os níveis globais e espectrais de ruído, para cada posição do microfone separadamente (Bühlmann, et al., 2011).

A Tabela 10 apresenta os coeficientes de correção da temperatura, para ambos os pneus em estudo e em todas as superfícies rodoviárias avaliadas.

Tabela 10 - Coeficientes da temperatura em relação ao tipo de pavimento e tipo de pneu

Tipo de Pavimento	SRTT	Avon AV14
Denso	-0.10	-0.11
Cimento	-0.08	-0.06
Poroso	-0.05	-0.08

A partir da Tabela 10, pode-se concluir que há uma redução de 0.01 dB(A) para o betão betuminoso denso e 0.02 dB(A) para o betão betuminoso poroso.

Dentro do intervalo de temperatura, para a medição do CPX, de 5 °C a 30 °C, os níveis de ruído totais podem variar até 2,75 dB(A) para o pneu Avon AV4 e até 2,5 dB(A) para o pneu SRTT.

2.8.5 Comparação e Discussão dos resultados dos Projetos

De um modo geral não foi possível comparar os projetos entre si, porque o método utilizado na avaliação do ruído da interação do pneu com o pavimento foi diferente e o tipo de pneu também variou de projeto para projeto.

Assim, no projeto francês, ao ser utilizado o método CPB, podemos verificar que o tipo de pavimento mais ruidoso é o betão de cimento, CC, com um fator de correção de 2.2, ao contrário da mistura betuminosa porosa, PAC, que tem 1.4.

O projeto HARMONOISE, utilizando o método SPB/CPB, conclui que para 10 °C, no caso do betão betuminoso denso, DAC, acresce 1.0 dB(A) de ruído da interação entre o pneu e o pavimento, em relação às misturas com borracha, DACR e PERS, crescem 1.0 e 0.6 dB(A), respetivamente. Quanto ao betão betuminoso poroso, PAC, há um acréscimo de, aproximadamente, 0.6 dB(A).

O projeto CNOSSOS, ao utilizar o método CPX, mostra que os coeficientes de temperatura variam consoante a categoria do veículo utilizado, a classe de textura e de porosidade, presente em cada mistura betuminosa, diferenciando as que têm classe de porosidade menor do que 5%, entre 5 a 15% e superior a 15%. Para uma possível comparação com os dados obtidos desta dissertação, analisa-se os dados referentes à categoria 1, que corresponde aos veículos ligeiros. As misturas que obtêm um coeficiente de temperatura superior são aquelas que têm a classe de textura superior a 1.5 mm, e a classe de porosidade inferior a 15%, sendo as menos ruidosas as que têm uma classe de porosidade superior a 15% e a classe de textura inferior a 1.5 mm.

Quanto ao projeto Suíço, este avalia o ruído da interação entre o pneu e o pavimento, recorrendo ao método CPX, entre dois tipos de pneus, SRTT e AvonAV4, e três tipos de pavimentos, denso, poroso e de cimento. Avaliando um tipo de pneu, o SRTT, conclui-se que para baixas frequências (315-630 Hz), há uma diminuição de ruído de 0.03, para mistura betuminosas porosas e 0.07 nas densas e em cimento. Para altas frequências (1600-5000 Hz) a mistura betuminosa densa é a que possui maior coeficiente de temperatura (0.17).

Nas Tabelas 11 e 12, apresentam-se uma compilação dos valores dos coeficientes K (correção da temperatura) que originaram dos projetos descritos anteriormente. Essas tabelas estão divididas pelo tipo de método utilizado para a medição do ruído da interação do pneu com o pavimento, tendo por objetivo uma melhor comparação dos valores.

Como se pode verificar nas Tabelas 11 e 12, há uma discrepância muito significativa entre os valores resultantes do projeto Francês, e todos os outros projetos. Assim sendo, depara-se com valores superiores a 1, no projeto Francês devido a este ter utilizado o nível sonoro máximo e inferior a 1 nos restantes projetos, porque foi utilizado o nível sonoro equivalente.

Tabela 11 - Coeficientes de temperatura, do projeto Francês e HARMONOISE, em CPB

Pavimento	Francês	HARMONOISE
Denso (DAC)	1.6	0.10
Poroso (PAC)	1.4	0.05
Fino (VTAC)	1.7	0.10
Borracha	-	0.10

Tabela 12 - Coeficientes de temperatura, do projetos CNOSSOS e Suíço, em CPX

Pavimento	CNOSSOS	Suíço
Denso (DAC)	0.06	0.10
Poroso (PAC)	0.08	0.05
Fino (VTAC)	0.04	-
Borracha	-	-

3. MATERIAIS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS

Este capítulo tem por objetivo apresentar a metodologia geral utilizada e os locais de ensaio e ainda fazer uma descrição detalhada dos métodos experimentais adotados, para a medição da temperatura, do ruído, do amortecimento e da absorção.

Primeiramente selecionaram-se três trechos a estudar. Os trechos têm um comprimento, aproximadamente, de 100 metros e os resultados foram analisados em intervalos de 20 metros. A camada de desgaste de cada um desses trechos é respetivamente de betão betuminoso clássico (AC14), betão betuminoso drenante e mistura betuminosa com betume modificado com borracha, identificados ao longo do texto como pavimento clássico, drenante e com borracha. Na Figura 15 apresenta-se o aspeto da superfície.

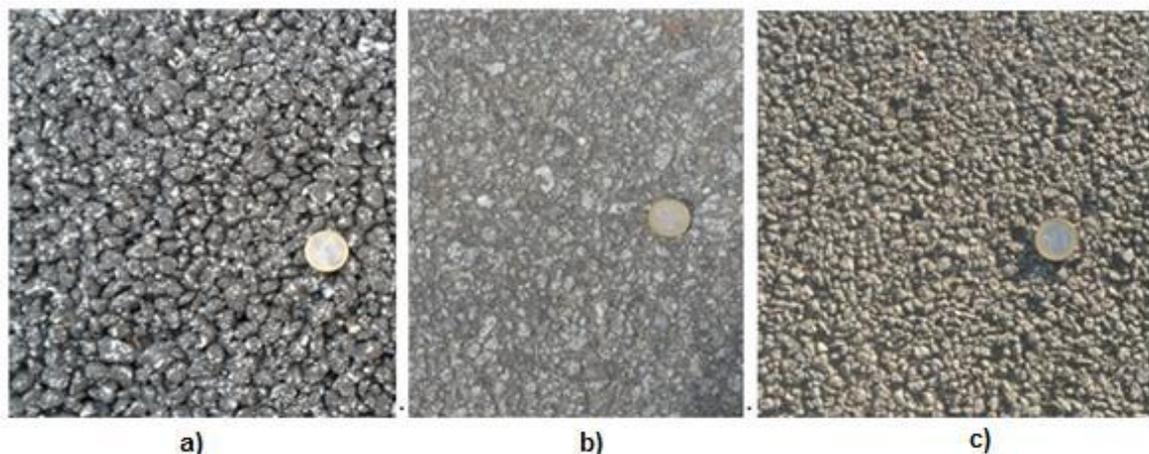


Figura 15 - Superfícies de estrada em estudo: a) Betão betuminoso drenante; b) Betão betuminoso clássico; c) Betão betuminoso com mistura de borracha

O trecho que é constituído pela camada de desgaste de betão betuminoso drenante, pertence a uma via onde se praticam velocidades elevadas. Sendo os outros trechos do tipo de vias onde se praticam velocidades inferiores a 90 km/h, constituídas por betão betuminoso clássico e por betão betuminoso com mistura de borracha.

Todos os trechos são constituídos por camadas de desgaste muito utilizadas em Portugal, sendo o betão betuminoso clássico considerado como referência. O betão betuminoso com mistura de borracha e o drenante foram escolhidos, porque existem poucos estudos de ruído, amortecimento e absorção nestas camadas.

De seguida foram executados os ensaios ao longo de um dia em cada trecho com início cerca das 6h até às 18h, intervalados de 2 em 2 horas aproximadamente. Desta forma é possível obter-se resultados em que as condições de ensaio que se alteram são a temperatura e a velocidade do vento.

A medição do ruído foi feita através do método CPX, sendo que este é executado com o auxílio de dois microfones junto do pneu de ensaio, realizado sempre no mesmo sentido. As velocidades adotadas foram apoiadas nos limites definidos por lei e ainda nos valores preconizados na norma de ensaio. Optou-se pelas velocidades: 50 km/h, 75 km/h e 110 km/h, sendo que nos pavimentos clássico e de borracha foram praticadas as de 50 km/h e 75 km/h e no pavimento drenante foram praticadas as de 75 km/h e 110 km/h, devido à classificação das vias. Foi feita uma passagem a cada nível de velocidade, aproximadamente de 2 em 2 horas, para que se obtivesse variações de temperatura significativas.

Simultaneamente foi feita a medição da temperatura do ar e da temperatura da superfície da estrada, da velocidade do vento, da dureza do pneu e do amortecimento. A absorção foi medida apenas no início e no final do período de ensaios.

Finalmente, na análise dos resultados, pretende-se relacionar a temperatura do pavimento com o ruído, o ruído com o amortecimento, o ruído com a absorção sonora do pavimento e o ruído com a dureza do pneu.

3.1 Avaliação das temperaturas

Em cada ponto de ensaio e ao longo do dia foram medidas as temperaturas do ar e do pavimento. Foi ainda medida a velocidade do vento. A temperatura dos pavimentos foi registada com um termómetro Infravermelho *Mastech* de formato pistola e modelo MS-6530 e a temperatura do ar e velocidade do vento registadas com um Anemómetro de fluxo digital AVM-05/A VM-07 (Figura 16).

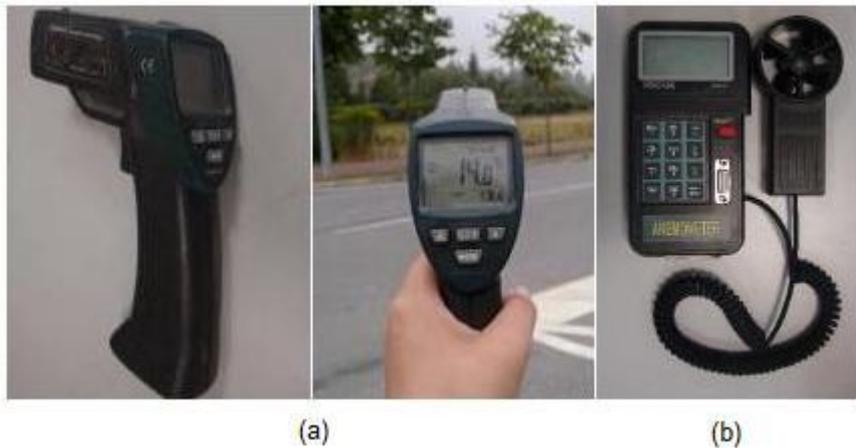


Figura 16 – Equipamentos utilizados para a medição da temperatura: a) Termómetro e b) anemómetro

3.2 Avaliação do ruído pneu/pavimento

O método de medição do ruído utilizado foi o método CPX, que pode ser realizado a partir de um atrelado ou com os microfones colocados diretamente no pneu de ensaio, tal como descrito anteriormente. Neste caso, optou-se pela medição do ruído a partir de microfones colocados diretamente na roda de um veículo, conforme o recomendado na norma ISSO/DIS 11819-2:2012: “Acoustics – Measurement of the influence of the road surfaces on traffic noise – Part 2: Close-proximity method” (Figura 17).

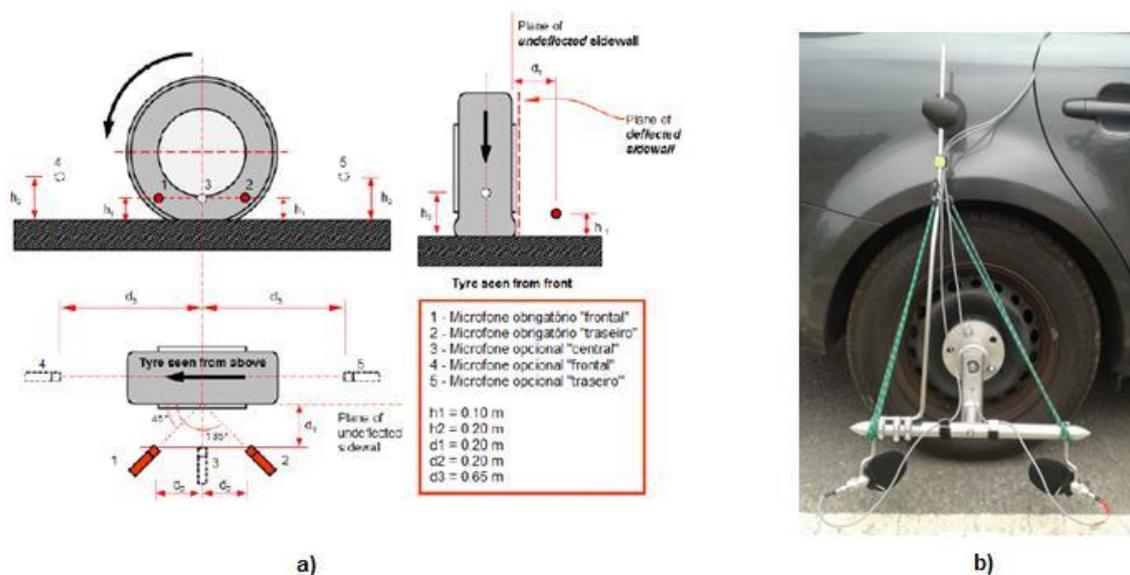


Figura 17 – Método CPX: a) Posição e respetivas distâncias dos microfones (ISO/DIS11819-2, 2012); b) Montado no pneu de ensaio

3.3 Avaliação do amortecimento

O ensaio de impedância mecânica, que permite extrair o fator de amortecimento, consiste na excitação do material a ser estudado. O impacto é aplicado, diretamente sobre cada superfície da estrada, através de pancadas produzidas manualmente com um martelo de impacto instrumentado, com intervalo de força definido. Além do martelo de impacto também é fundamental o auxílio de um acelerômetro, sendo esse colocado com cera de abelha, na superfície da estrada a ser estudada. A força aplicada e a respectiva aceleração do sistema foram registradas e tratadas com o auxílio de um analisador de sinais, estando esse preparado para a determinação do amortecimento.

O martelo de impacto e o acelerômetro estão ligados a um condicionador de sinal que por sua vez está ligado a um dispositivo de aquisição de dados para conversão de analógico para digital. Os dados obtidos são armazenados num computador.

A obtenção das frequências de referência e do amortecimento são obtidas diretamente a partir de um processamento automático programado (normalmente em MATLAB) com o auxílio do conceito de FRF (Função de resposta em frequência).

O esquema representativo do sistema utilizado encontra-se esquematizado na Figura 18.

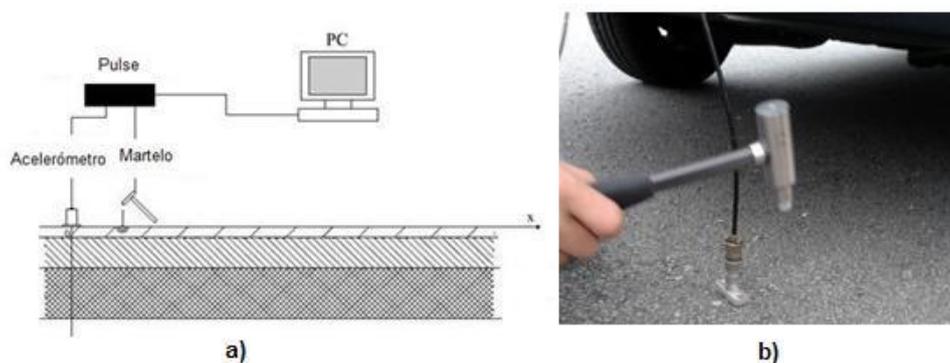


Figura 18 - Método utilizado para a medição do amortecimento: a) Esquema representativo e b) Método aplicado in situ

Este método foi executado várias vezes, ao longo do dia, no mesmo local, em cada trecho. Para este ensaio teve que se ter em atenção a passagens de veículos perto do local,

parando o ensaio em execução, principalmente veículos pesados, que produzem vibrações e interferem na medição da aceleração.

3.4 Avaliação da impedância acústica

Para a medição da absorção, normalmente é utilizado um tubo de impedância acústica, também designado como “tudo de Kundt”, que permite a realização de medições in situ. A principal característica deste tubo é a extremidade aberta, que é colocada sobre a superfície em estudo. Algumas das suas aplicações principais são, a medição in situ da impedância da superfície e a medição do coeficiente de absorção de pavimentos. O coeficiente de absorção é calculado em função da impedância acústica do pavimento, ao longo de um intervalo de frequências de 250 Hz a 2,5 kHz (1/3 de oitava) (Freitas, et al., 2012).

A medição da absorção realizou-se em dois períodos diferentes do dia, no início e no final, para haver uma variação de temperatura significativa, dado que não é expectável haver uma grande influência de temperatura neste pavimento. O rodado foi o local escolhido para efetuar este ensaio. Na Figura 19 pode se verificar o esquema que mostra como é que o tudo de impedância é composto (Figura 19 a)) e o todo o sistema de aquisição montado do local em estudo (Figura 19 b)).

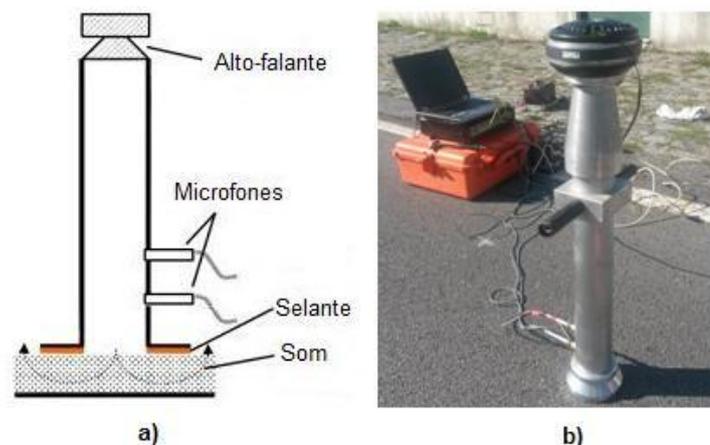


Figura 19 – Ensaio da impedância acústica: a) Esquema do tubo de Kundt (Tijis, 2013); b) Tudo montado no local de estudo

3.5 Avaliação da dureza do pneu

A dureza do pneu é a dureza da borracha que este possui. Este parâmetro poderá estar relacionado com a temperatura do pavimento, que está em contacto diretamente com o pneu. Para a sua medição é utilizado um aparelho, designado durómetro. Este aparelho pode ser analógico ou digital (Figura 20) (ASTM D2240-00,2002).

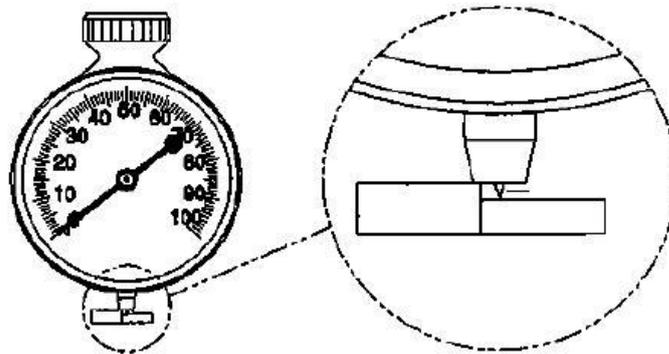


Figura 20 – Durómetro (ASTM D2240-00,2002)

Quanto aos durómetros analógicos, estes variam consoante a geometria do objeto que entra em contacto com o pneu (Figura 21 a) a c)). A Figura 21 d), representa a ponteira de um durómetro digital. O aparelho utilizado neste estudo foi um durómetro digital, em que a ponteira está representada na Figura 21 d) (ASTM D2240-00,2002).

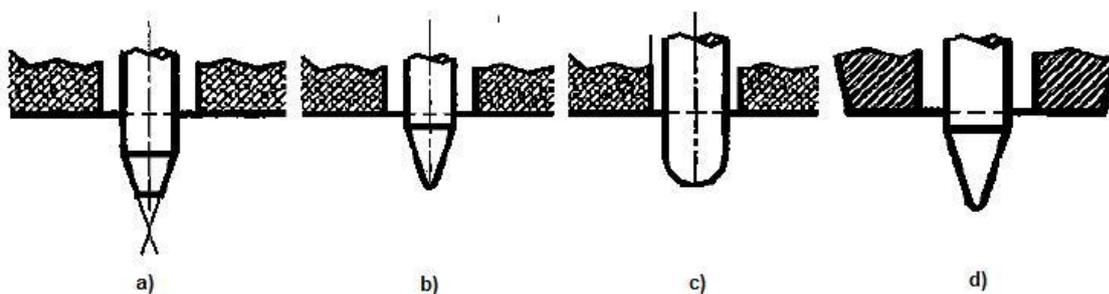


Figura 21 – Pontas de Durómetros (ASTM D2240-00,2002)

Os valores da dureza variam de 0 a 100. As leituras abaixo de 20 ou acima de 90 não são considerados confiáveis. Sugere-se que essas leituras, não sejam gravadas, nem anotadas, fazendo nova medição (ASTM D2240-00,2002).

Este ensaio consiste em colocar o durómetro em contacto com o pneu, fazendo uma força entre o durómetro e o pneu, de modo que a placa que envolve a ponteira do durómetro encoste no material (Figura 22). Daí mede-se o valor da dureza, correspondente. Neste caso o ensaio foi feito em várias partes do pneu, utilizando a média dos valores obtidos.



Figura 22 – Medição da dureza do pneu, com auxílio de um durómetro

3.6 Caracterização do veículo de ensaio e pneu de ensaio

O veículo utilizado para a realização do ensaio do ruído faz parte das categorias preconizadas na norma adotada. Optou-se por um veículo ligeiro de passageiros e pelo pneu ContiEcoContactTM 3 195/R15, apresentados na Figura 23.



Figura 23 - Veículo e pneu utilizados no estudo

4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Este capítulo tem como principal objetivo apresentar, analisar, discutir e relacionar os resultados obtidos, provenientes dos diferentes ensaios realizados, nos três tipos de pavimentos, descritos no Capítulo 3. Esta análise permite determinar e avaliar a influência da temperatura no ruído pneu/pavimento, comparando os resultados com vários projetos de referência na Europa. Para além disso, neste capítulo também se avalia a influência da temperatura nas características das camadas superficiais do pavimento, como o amortecimento e a absorção.

No Subcapítulo 4.1 apresenta-se e analisa-se os resultados da caracterização das condições meteorológicas e da temperatura do pavimento.

No Subcapítulo 4.2, apresenta-se os resultados do ensaio CPX, que determina o ruído da interação do pneu com o pavimento, em todos os tipos de pavimentos.

Relativamente ao Subcapítulo 4.3, avalia-se os resultados obtidos correspondentes à dureza do pneu de ensaio.

No Subcapítulo 4.4 e 4.5 analisa-se os resultados do amortecimento e da absorção das camadas superficiais, respetivamente, realizados com a ajuda do martelo e do acelerómetro e do pelo Tubo de Kundt, respetivamente.

Nos últimos dois Subcapítulos, relaciona-se os resultados obtidos do ruído pneu/pavimento com o amortecimento e a dureza do pneu.

4.1 Caracterização e análise das condições meteorológicas e temperatura do pavimento

A temperatura da superfície do pavimento e a velocidade do vento são dois fatores climáticos que influenciam o ruído, devendo os seus efeitos ser corrigidos. De uma forma geral, um aumento de temperatura ou uma redução da velocidade do vento traduz-se numa redução do nível de ruído. A correção a fazer-se ao nível de ruído varia consoante o

local onde são efetuadas as medições da temperatura, que podem ser a do ar, do pneu, ou da superfície do pavimento.

A norma ISO11819-1, 1997 estabelece que a temperatura do ar e do pavimento, bem como a velocidade do vento deverão ser observadas. Além disso, referem também que a temperatura do ar deverá ser medida em intervalos de 15 minutos, que a temperatura da superfície do pavimento deve situar-se entre os 5°C e os 50°C e que a velocidade do vento à altura do microfone não exceda 5 m/s durante as medições, já que as mesmas influenciam o ruído. Estes aspetos foram considerados durante os ensaios, exceto a condição da temperatura do ar, que foi medida aproximadamente de hora em hora, isto é, no momento da medição do ruído e do amortecimento, num local considerado representativo. Durante as medições da temperatura do pavimento também se deparou com temperaturas superiores a 50°C.

A velocidade do vento influencia fortemente o ruído aerodinâmico a velocidades superiores a 120 Km/h para os veículos ligeiros e a 90 Km/h para os veículos pesados.

Para efetuar este estudo, foi necessário ter em conta as condições meteorológicas, visto que só era possível iniciar os trabalhos caso o dia estivesse de sol, com pouco ou nenhum vento e sem chuva. Apesar das aquisições terem sido efetuadas em dias diferentes, as datas foram próximas e as condições meteorológicas foram idênticas. Como tal, pode-se observar que, não existe uma grande variação nas temperaturas assinaladas. Relativamente à velocidade do vento, esta foi verificada em todos os locais dos trechos em análise, tendo sempre uma velocidade inferior a 1 m/s. Desta forma foi cumprido o critério da norma que impõe uma velocidade do vento não superior a 5 m/s à altura do microfone, quando não contém o involucro em torno do microfone e do pneu. Na Tabela 13, estão representados os valores da temperatura do ar e do pavimento, com as respetivas horas das medições, para cada tipo de pavimento.

Na Tabela 13 pode-se observar que a temperatura do pavimento aumenta à medida que a temperatura do ar aumenta, em todos os tipos de pavimentos em estudo. No caso do pavimento drenante e do pavimento clássico, tanto a temperatura do ar como a do pavimento foram medidas das 7h até às 17h30. Enquanto que a do pavimento de mistura com borracha foi medida das 9h30 às 16h30.

Tabela 13 – Valores da temperatura do ar e da temperatura do pavimento para cada tipo de pavimento

	Clássico		Borracha		Drenante	
	T. ar	T. pav.	T. ar	T. pav.	T. ar	T. pav.
	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)
7h00	14.4	23.7			21.8	17
8h00	14.9	24.2			23.2	19.6
9h00					24.5	29.2
9h30			23	26.3		
10h00			26	27.3		
10h45			30	30.2		
11h00	21.6	29.3			30.1	41.4
11h30			30.5	33.5		
12h00			31	34.6		
13h00					32	48.1
14h00	29	37.3	34	36.2	34.2	51.4
15h00	31	42.9			33.8	50.2
15h45			31.5	37.3		
16h00	26.5	46			31.1	49.3
16h30			30.2	38.7		
17h00	27.8	46.7			28.2	47.1
17h30					27.3	47

A temperatura do ar, em todos os tipos de pavimentos, foi aumentando ao longo do dia até às 16h. Relativamente ao pavimento clássico, houve um acréscimo da temperatura do ar às 17h. Esse crescimento pode ter sido originado por vários fatores, como o aumento da velocidade do vento e a posição incorreta do termómetro no momento da medição. A temperatura do pavimento, a nível geral, apresenta a mesma tendência de subida durante mais algum tempo mesmo após a diminuição da temperatura do ar. Isso deve-se ao facto de o pavimento continuar a libertar energia, acumulada durante o dia.

A seguir apresenta-se a variação das duas temperaturas, nas Figuras 24 a 26. Estas figuras que se encontram à esquerda relacionam as temperaturas, em ordem ao tempo (às horas em que foram realizadas as medições) e as da direita relacionam as duas temperaturas, sendo apresentada a reta de regressão e respetivo coeficiente de determinação (R^2).

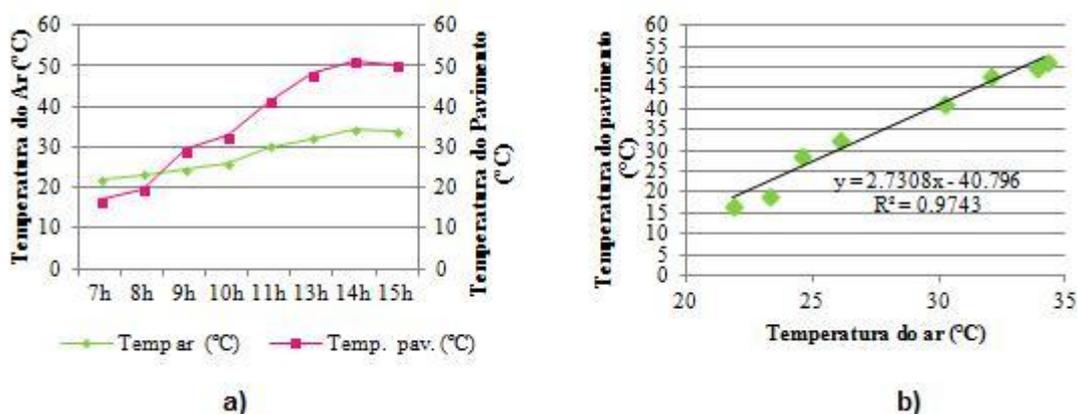


Figura 24 - Temperatura do ar e a temperatura do pavimento drenante: a) em função do tempo; b) relação entre as duas temperaturas

No caso do pavimento drenante (Figura 24), observa-se que a temperatura do ar e do pavimento foi aumentando significativamente das 7h às 15h, embora o aumento da temperatura do pavimento seja mais acentuado. Observa-se um pico cerca das 14h.

A relação entre a temperatura do pavimento e a temperatura do ar é muito boa, como se verifica pelo coeficiente de determinação (0.97), sendo que esta aumenta à medida que a temperatura do ar aumenta. Conclui-se que o aumento de 1°C da temperatura do ar corresponde a um aumento de 2.7°C da temperatura do pavimento.

No caso do pavimento clássico (Figura 25), pode-se observar que a temperatura do ar foi aumentando significativamente, das 7h às 15h, tendo havido um decréscimo das 15h até ao final das medições (17h). A temperatura do pavimento vai aumentando mais acentuadamente, havendo um pico próximo dos 55°C às 17h30.

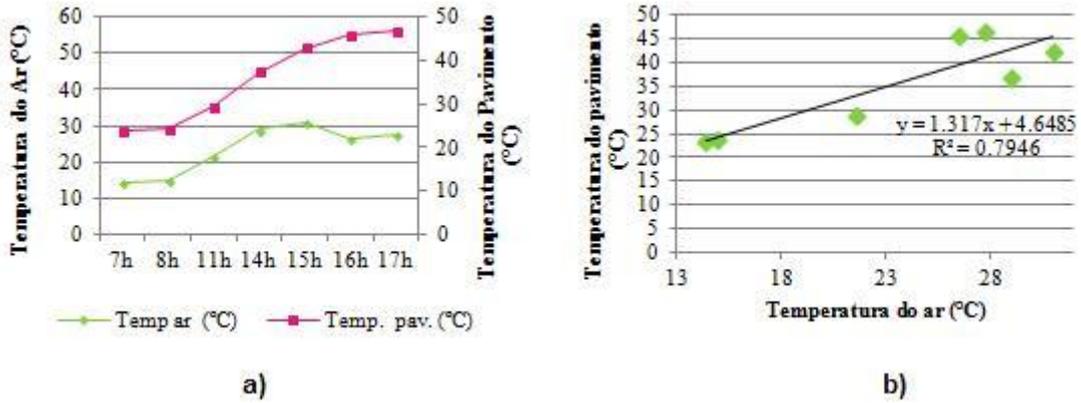


Figura 25 - Temperatura do ar e a temperatura do pavimento clássico: a) em função do tempo; b) relação entre as duas temperaturas

Quanto à relação entre a temperatura do pavimento e a temperatura do ar, esta vai aumentando, à medida que a temperatura do ar aumenta. Pode-se concluir que a temperatura do pavimento aumenta 1.3 vezes a cada grau que aumenta a temperatura do ar. Neste caso a relação entre as duas temperaturas é de qualidade inferior ($R^2=0.79$), embora continue aceitável.

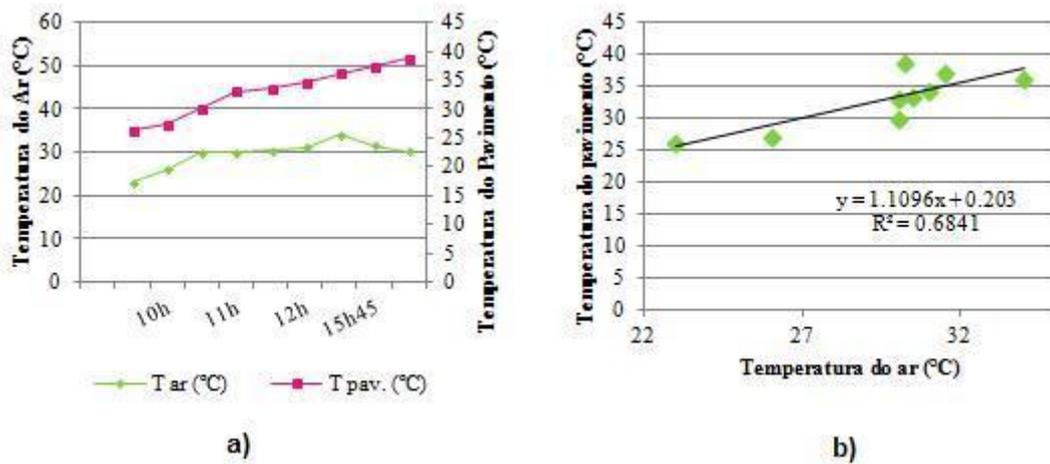


Figura 26 - Temperatura do ar e a temperatura do pavimento borracha: a) em função do tempo; b) relação entre as duas temperaturas

Relativamente ao pavimento com borracha (Figura 26), pode-se observar que a temperatura do ar foi aumentando das 9h30 às 14h e desceu a partir desse momento até ao final das medições. A temperatura do pavimento aumentou significativamente.

Quanto à relação entre a temperatura do pavimento e a temperatura do ar, esta vai aumentando, à medida que a temperatura do ar aumenta. Pode-se concluir que a temperatura do pavimento aumenta 1.1 vezes a cada grau que aumenta a temperatura do ar. A qualidade do auste é inferior à dos restantes pavimentos, embora continue aceitável.

Perante os resultados anteriormente descritos, conclui-se que a temperatura do ar apresenta variações e picos em certas alturas do dia. Sendo assim, a temperatura ideal para uma melhor comparação dos resultados é a temperatura do pavimento.

4.2 Caraterização do ruído pneu/pavimento

O ensaio de CPX permite caraterizar o ruído da interação do pneu com o pavimento de cada tipo de superfície. Para este ensaio foram determinados os indicadores de ruído rodoviário, L_{eq} e $L_{máx}$, correspondentes a uma distância percorrida de 20 metros. O ensaio foi realizado a velocidades distintas, 50, 75 e 110 km/h, sendo a de 75 km/h comum a todos os tipos de pavimento. Como, não foi possível praticar velocidades exatas foi necessário fazer uma correção dos dados obtidos a partir do CPX. Essa correção foi feita através da equação da reta proveniente dos resultados obtidos, para 2 níveis de velocidade e o nível de ruído medido correspondente (Equação 8).

$$y = mx + b \quad (8)$$

Sendo:

y – Valor do L_{eq} ou do $L_{máx}$ corrigido, consoante o pretendido;

m – Declive da reta;

x – Velocidade que se pretende, relativamente ao nível de pressão sonora (50, 75 ou 110 km/h);

b – Ordenada na origem.

Tabela 14 - Valores dos Níveis de Pressão Sonora corrigidos, para as velocidades pretendidas

	T. Pav. (°C)	V. (corrigida) (km/h)	Nível Sonoro Equivalente			Nível Sonoro Máximo			
			m	b	Leq (dB(A))	m	b	Lmáx (dB(A))	
Borracha	26.3	50	0.30	75.24	89.72	0.29	76.52	90.77	
		75			96.51			97.46	
	33.5	50	0.36	71.08	87.90	0.37	71.57	88.83	
		75			97.56			98.74	
	36.2	50	0.29	75.60	88.96	0.30	75.89	89.70	
		75			98.27			99.32	
	38.7	50	0.25	78.00	90.34	0.26	78.58	91.17	
		75			96.83			97.80	
	Clássico	23.7	50	0.27	80.23	93.04	0.27	81.18	93.98
			75			100.24			101.18
24.2		50	0.28	78.80	91.86	0.30	79.17	92.79	
		75			99.53			100.79	
29.3		50	0.26	80.66	91.88	0.25	82.04	92.94	
		75			100.49			101.30	
37.3		50	0.28	79.57	92.61	0.28	80.42	93.49	
		75			100.10			101.00	
42.9		50	0.30	77.35	90.09	0.30	78.13	91.04	
		75			100.46			101.55	
46.0	50	0.28	78.11	91.10	0.27	79.39	92.01		
	75			99.58			100.23		
Drenante	19.6	50	0.12	90.77	100.11	0.11	93.65	101.89	
		75			103.30			104.71	
	32.8	50	0.11	90.37	98.48	0.09	93.96	100.42	
		75			101.40			102.74	
	51.4	50	0.14	89.64	99.85	0.14	91.15	101.49	
		75			103.84			105.53	
	47.1	50	0.11	92.58	100.64	0.10	95.01	102.38	
		75			103.65			105.13	

A Tabela 14 apresenta os valores corrigidos, do L_{eq} e do $L_{máx}$.

Para ser possível comparar, o nível de ruído em função da temperatura entre os diferentes tipos de pavimento foi elaborada a Tabela 15 para a velocidade de 75 km/h, visto que foi a velocidade comum a todos os tipos de pavimento.

Tabela 15 - Ruído pneu/pavimento, para a velocidade de 75 Km/h, de todos os pavimentos estudados

	Temperatura Pavimento (°C)	L_{eq} (dB(A))	$L_{máx}$ (dB(A))
Borracha	26.3	96.52	97.46
	33.5	97.56	98.74
	36.2	98.27	99.32
	38.7	96.8	97.80
Clássico	23.7	100.24	101.18
	24.2	99.53	100.79
	29.3	100.49	101.30
	37.3	100.10	101.00
	42.9	100.46	101.55
	46	99.58	100.23
Drenante	19.6	100.11	101.89
	32.8	98.48	100.42
	51.4	99.85	101.49
	47.1	100.64	102.38

As Figuras 27 e 28 apresentam as relações obtidas para cada tipo de pavimento, tanto do L_{eq} como $L_{máx}$.

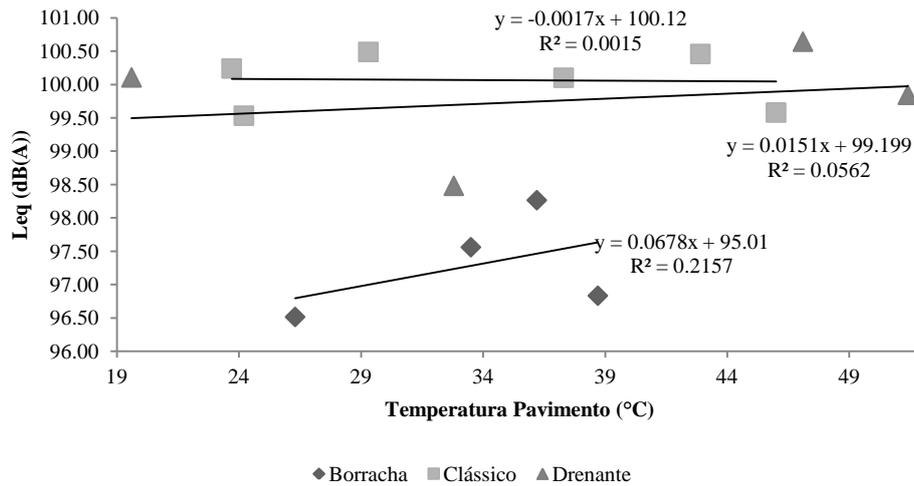


Figura 27 - Nível de Pressão Sonora Equivalente dependendo da Temperatura do Pavimento, a 75 km/h

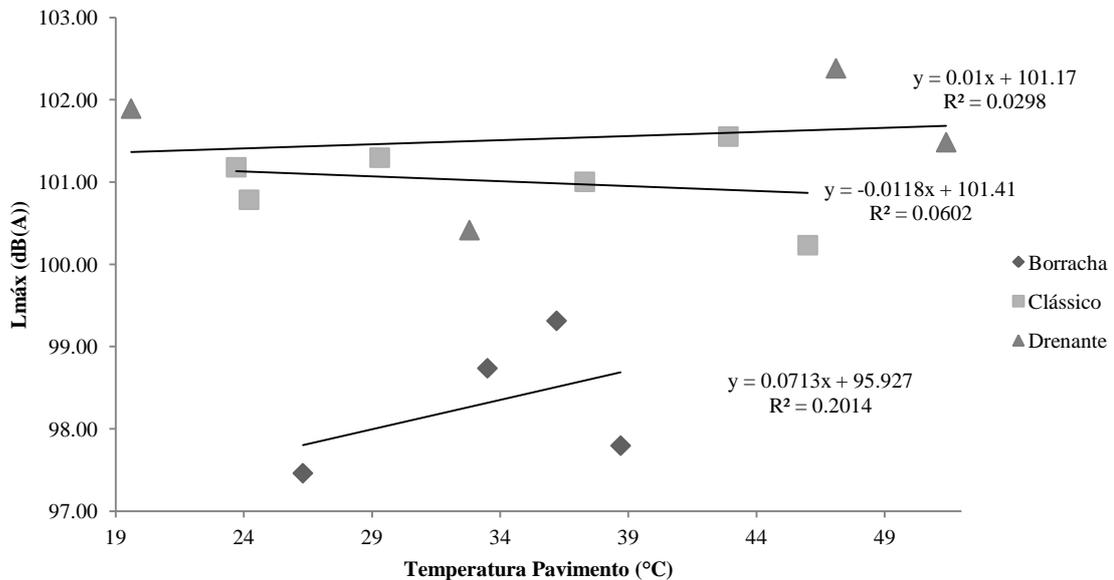


Figura 28 - Nível de Pressão Sonora Máximo dependendo da Temperatura do Pavimento, a 75 km/h

Conforme a Figura 27, em relação ao L_{eq} , conclui-se que o tipo de pavimento mais ruidoso, à velocidade de 75 km/h, é o clássico, não havendo variação em diferentes temperaturas do pavimento. Quanto ao pavimento com borracha, nota-se que é o menos ruidoso, mas a relação entre o ruído e a temperatura parece variar muito, apresentando valores muito dispersos, comparativamente com os restantes pavimentos. Em relação ao pavimento drenante, verifica-se que o nível de pressão sonora varia pouco em função da

temperatura do pavimento, que é muito próximo do clássico e ainda que apresenta alguma dispersão.

Quanto ao $L_{m\acute{a}x}$ (Figura 28), conclui-se que o resultado obtido é diferente do resultado do L_{eq} , apresentando valores próximos entre o pavimento drenante e o clássico, sendo os superiores pertencentes ao drenante. O pavimento com borracha apresenta poucas variações em relação aos resultados do L_{eq} , apresenta uma dispersão na relação entre o ruído e a temperatura e continua ser o pavimento menos ruidoso.

Quanto aos ensaios a 50 km/h, foram realizados apenas nos pavimentos clássico e com borracha, sendo que os valores corrigidos estão apresentados na Tabela 16 e as respectivas retas de regressão na Figura 29.

Tabela 16 - Ruído pneu/pavimento, para a velocidade de 50 km/h, dos tipos de pavimento de Betão Betuminoso com mistura de Borracha e Betão Betuminoso Clássico

	Temperatura Pavimento (°C)	L_{eq} (dB(A))	$L_{m\acute{a}x}$ (dB(A))
Borracha	26.3	89.72	90.77
	33.5	87.90	88.83
	36.2	88.96	89.70
	38.7	90.34	91.17
Clássico	23.7	93.04	93.98
	24.2	91.86	92.79
	29.3	91.88	92.94
	37.3	92.61	93.49
	42.9	90.09	91.04
	46	91.10	92.01

Conforme a Figura 29 e para a velocidade de 50 km/h, conclui-se que o tipo de pavimento mais ruidoso, à velocidade de 50 km/h, é o clássico, observando-se agora uma variação mais significativa, que se traduz num R^2 de 0.47. Quanto ao de borracha repara-se que, existe um ponto (26.3;89.72) que está aparentemente anormal, mas pode-se verificar mais

adiante que poderá haver uma relação com o amortecimento. Este tipo de pavimento é o menos ruidoso, havendo um acréscimo do nível da pressão sonora, à medida que a temperatura do pavimento aumenta.

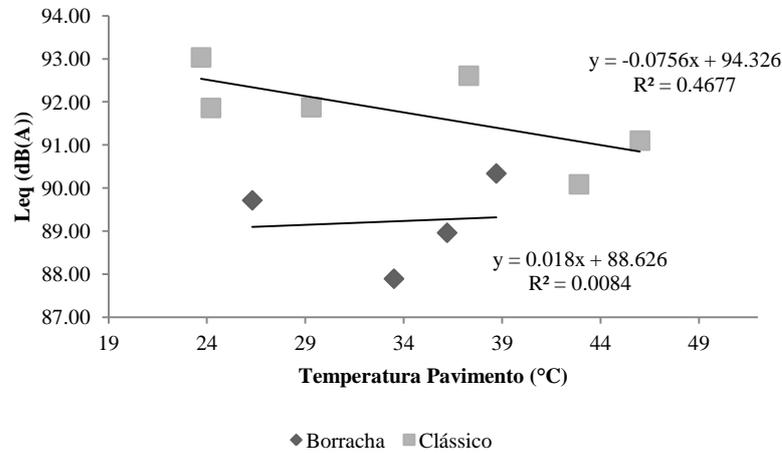


Figura 29 - Nível de pressão sonora equivalente dependendo da temperatura do pavimento, a 50 km/h

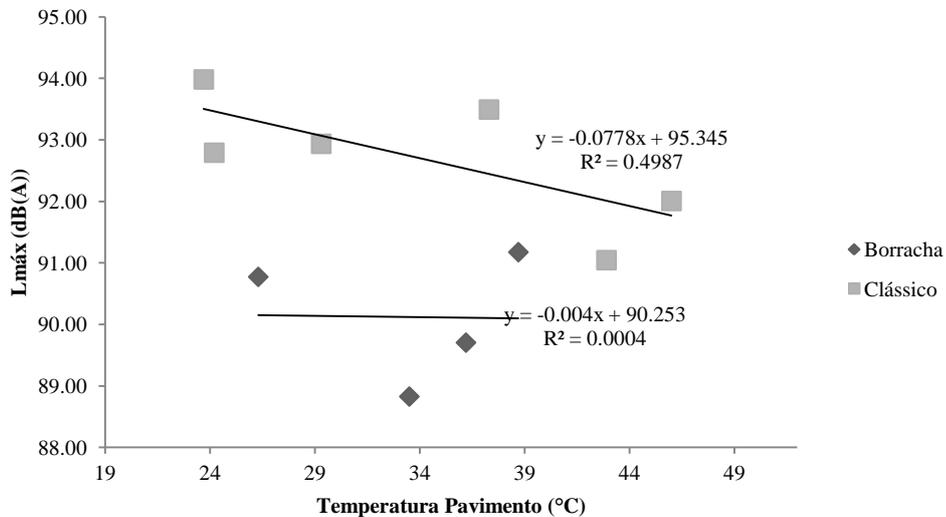


Figura 30 - Nível de pressão sonora máxima dependendo da temperatura do pavimento, a 50 km/h

O pavimento clássico apresenta valores do nível de pressão sonora máxima idênticos aos do L_{eq} , apresentando uma reta de regressão com o declive de 0.078 (Figura 30). O pavimento com borracha apresenta uma reta de regressão, neste caso, quase horizontal ($R^2 = 0.0004$), essa característica não resulta de resultados considerados bons, até porque esses continuam muito dispersos.

Para o caso do pavimento drenante foi realizada a medição do nível de pressão sonora, não só para a velocidade de 75km/h, mas também para 110 km/h. Os valores dessa medição estão apresentados na Tabela 17. Não é possível haver uma comparação com os outros tipos de pavimento, porque não foi efetuada a medição, a essa velocidade.

Tabela 17 - Ruído pneu/pavimento, para a velocidade de 110 km/h, do tipo de pavimento de Betão Betuminoso Drenante

	Temperatura Pavimento (°C)	Leq (dB(A))	Lmáx (dB(A))
Drenante	19.6	103.30	104.71
	32.8	101.40	102.74
	51.4	103.84	105.53
	47.1	103.65	105.13

Perante as Figura 31 e 32, observa-se que, a 110 km/h, o nível de pressão sonora equivalente aumenta à medida que a temperatura do pavimento também aumenta.

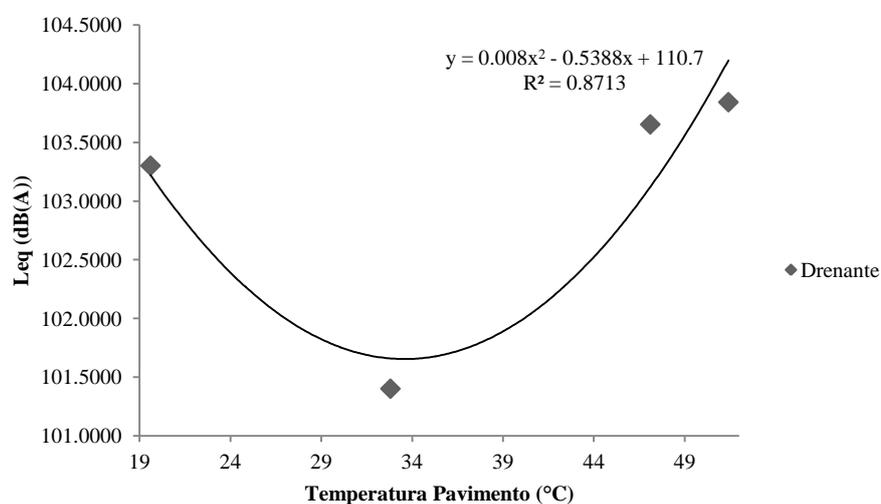


Figura 31 - Nível de pressão sonora equivalente dependendo da temperatura do pavimento drenante, a 110 km/h

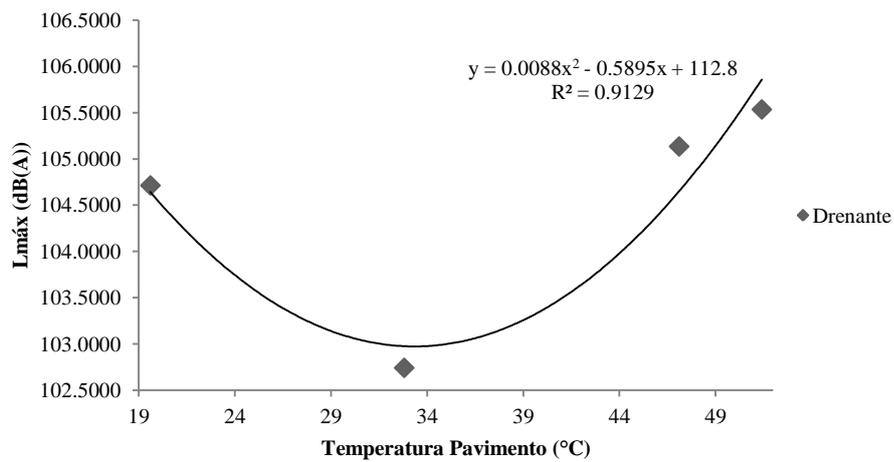


Figura 32 - Nível de pressão sonora máxima dependendo da temperatura do pavimento, a 110 km/h

Para analisar mais facilmente a variação do nível de ruído corrigido a diferentes velocidades, de cada pavimento, apresenta-se as Figuras 33 a 38, as quais representam a variação do nível de pressão sonora equivalente e máximo e ainda a inclinação da reta de regressão, às velocidades de 50 e 75 Km/h, para os pavimentos de betão betuminoso clássico e com mistura de borracha e 75 e 110 Km/h para o pavimento de betão betuminoso drenante.

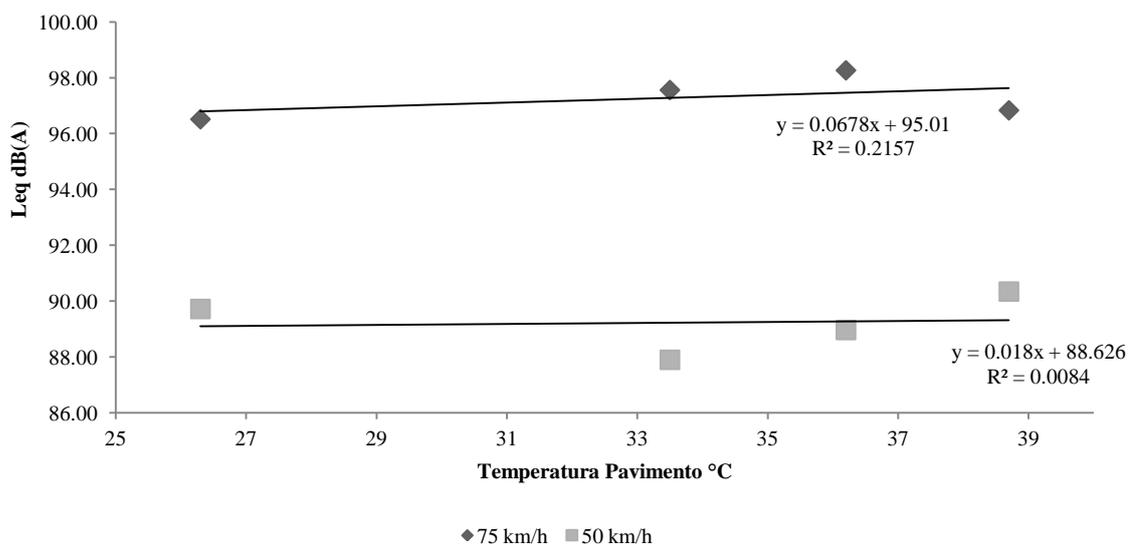


Figura 33 - Variação do nível de pressão sonora equivalente em relação à temperatura do pavimento, para as velocidades de 50 e 75 km/h, no betão betuminoso com mistura de borracha

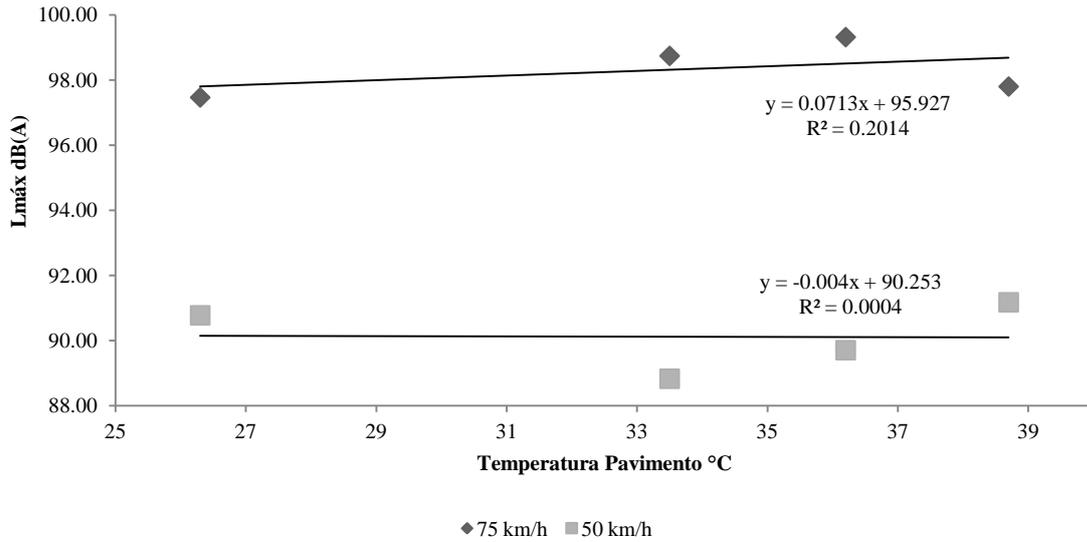


Figura 34 - Variação do nível de pressão sonora máxima em relação à temperatura do pavimento, para as velocidades de 50 e 75 km/h, no betão betuminoso com mistura de borracha

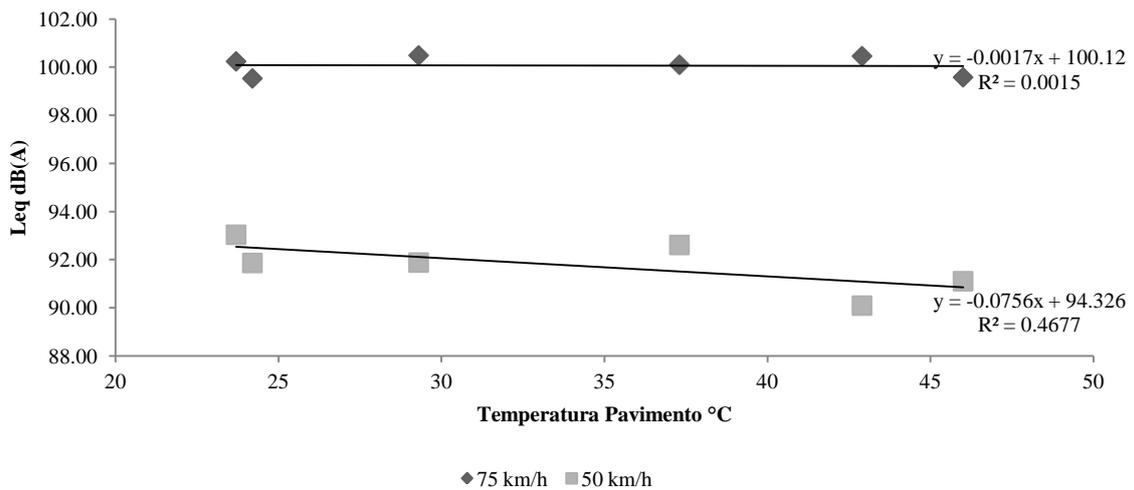


Figura 35 - Variação do nível de pressão sonora equivalente em relação à temperatura do pavimento, para as velocidades de 50 e 75 Km/h, no betão betuminoso clássico

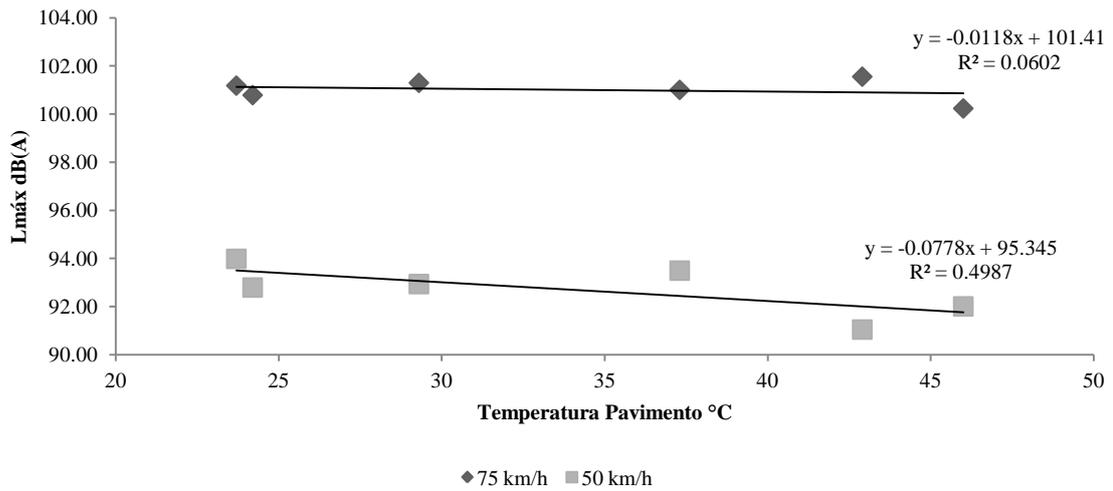


Figura 36 - Variação do nível de pressão sonora máxima em relação à temperatura do pavimento, para as velocidades de 50 e 75 Km/h, no betão betuminoso clássico

O nível de pressão sonora equivalente, varia 8 dB(A), para o pavimento de borracha, quando a velocidade passa de 50 para 75 Km/h (Figura 33). Já o pavimento de betão betuminoso clássico varia, aproximadamente, 10 dB(A) (Figura 35).

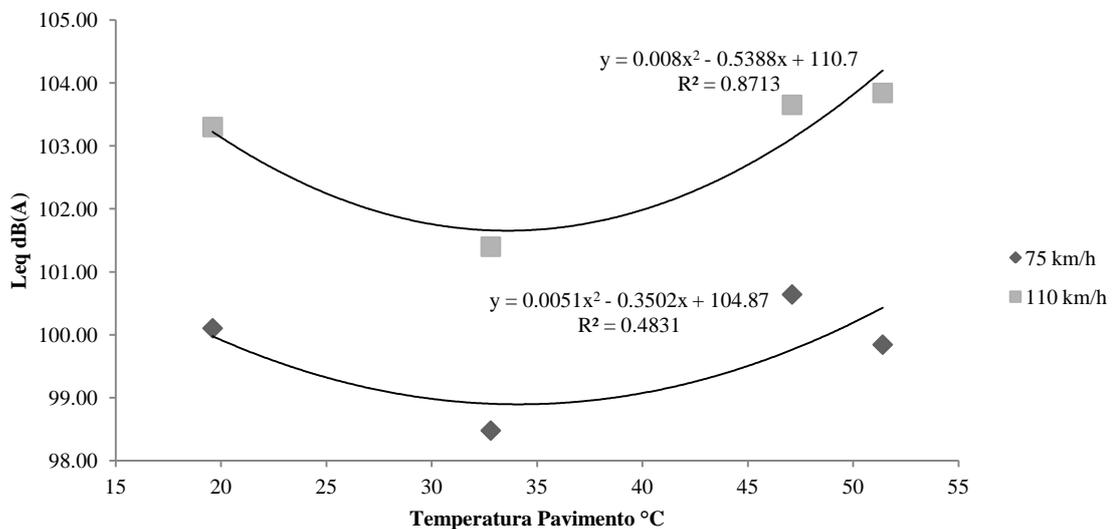


Figura 37 - Variação do nível de pressão sonora equivalente em relação à temperatura do pavimento, para as velocidades de 75 e 110 Km/h, no betão betuminoso drenante

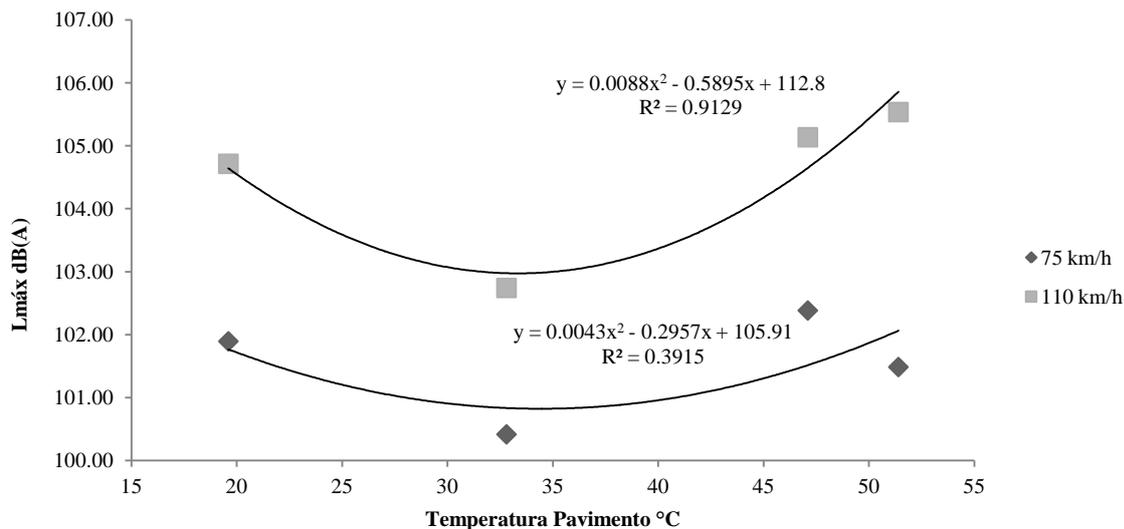


Figura 38 - Variação do nível de pressão sonora máxima em relação à temperatura do pavimento, para as velocidades de 75 e 110 Km/h, no betão betuminoso drenante

De acordo com a Figura 37 e 38, pode-se concluir que, para as velocidades de 75 km/h e 110 Km/h, o nível de pressão sonora equivalente e máxima varia 2.5 dB(A).

Quanto aos coeficientes obtidos a partir da reta de regressão, declive da reta, de cada tipo de pavimento, pode-se concluir que, estão próximos dos resultados dos projetos estudados anteriormente, exceto o pavimento clássico, à velocidade de 75 km/h (0.01).

4.3 Caraterização e análise da dureza do pneu

Para a determinação da dureza da borracha do pneu foi necessária a medição das duas temperaturas, do ar e do pavimento. A temperatura do pneu também podia ser alvo de estudo, mas neste caso não foi medida.

Na Tabela 18, estão representados os valores da dureza do pneu, relacionados com a temperatura do ar e da temperatura do pavimento. Observa-se, na maior parte dos casos, que à medida que a temperatura aumenta, a dureza do pneu diminui.

Tabela 18 - Valores da dureza do pneu e as respectivas temperaturas da superfície da estrada

Clássico			Borracha			Drenante		
T. ar (°C)	T. pav. (°C)	Dureza Pneu (Shore A)	T. ar (°C)	T. pav. (°C)	Dureza Pneu (Shore A)	T. ar (°C)	T. pav. (°C)	Dureza Pneu (Shore A)
14.4	23.7	65.8	26	27.3	65.0	24.5	29.2	65.5
14.9	24.2	65.7	31	34.6	64.9	31.1	49.3	63.9
21.6	29.3	65.3	34	36.2	64.5	28.2	47.1	64.4
29	37.3	64.4	30.2	38.7	64.4			
31	42.9	64.4						
26.5	46	64.3						
27.8	46.7	65.0						

Nas Figuras 39 a 41 apresenta-se a relação entre a dureza do pneu e a temperatura do ar e do pavimento.

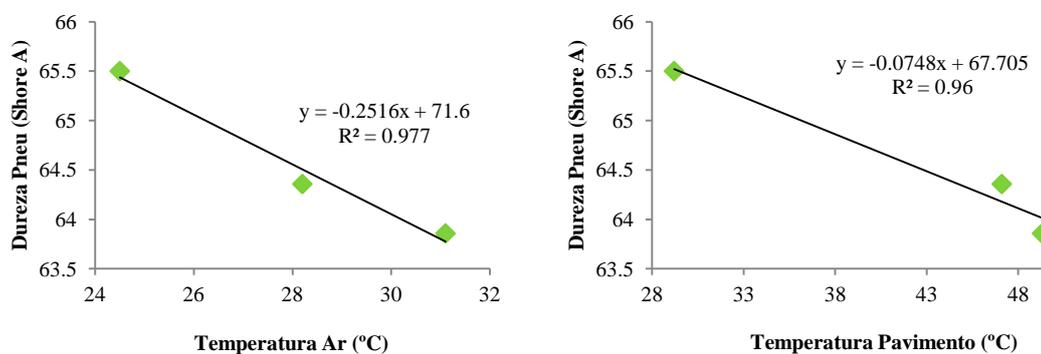


Figura 39 - Dureza do pneu em relação à temperatura do ar e do pavimento drenante

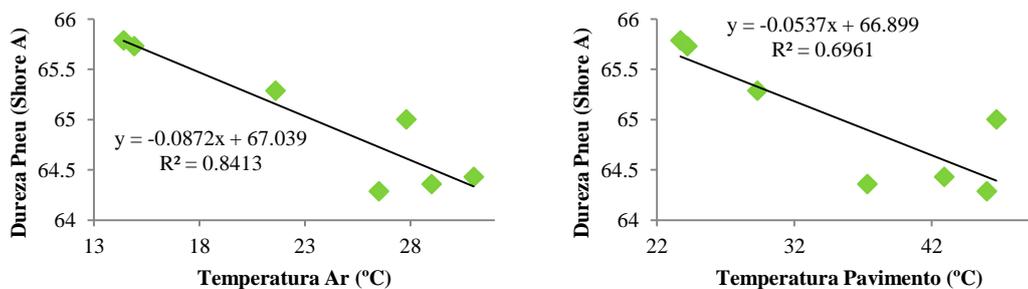


Figura 40 - Dureza do pneu em relação à temperatura do ar e do pavimento clássico

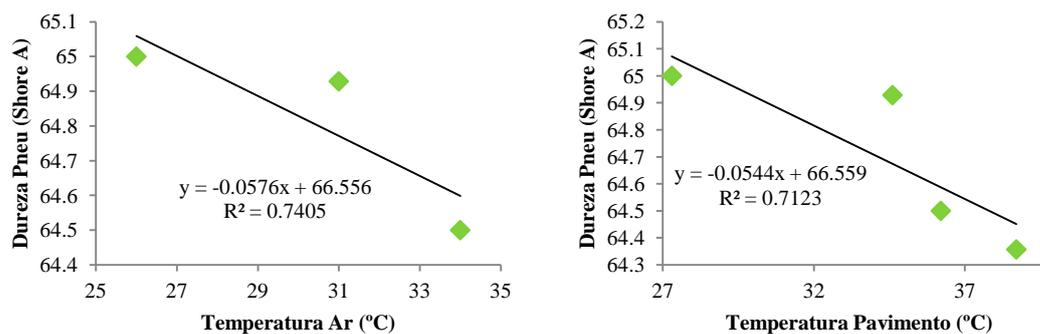


Figura 41 - Dureza do pneu em relação à temperatura do ar e do pavimento com borracha

Neste caso, como se confirma pelo coeficiente de determinação, a dureza do pneu relaciona-se melhor com a temperatura do ar, apresentando valores que podem ser considerados muito bons, como 0.97, 0.84 e 0.74.

De acordo com as Figuras 39, 40 e 41, pode-se concluir que a dureza do pneu decresce com o aumento da temperatura do ar e do pavimento. A variação da dureza do pneu com a temperatura do ar, no caso do pavimento drenante, varia abruptamente, apresentando o valor do declive da reta mais alto (0.25), em relação aos outros pavimentos. Quanto aos pavimentos clássico e com borracha apresentam um declive da reta muito próximos, 0.09 e 0.06 respetivamente.

4.4 Caracterização e análise dos resultados do ensaio de amortecimento

A partir dos ensaios de impedância obtiveram-se os valores de amortecimento para as respetivas frequências de ressonância, bem como as temperaturas do ar e do pavimento (Tabelas 19, 20 e 21).

Tabela 19 - Valores das frequências e do amortecimento do pavimento clássico

T. ar (°C)	T. pav. (°C)	Impedância Mecânica	
		Frequência (Hz)	Amortecimento (%)
21.6	29.3	743.4	14.9
29	37.3	722.1	24.2
26.5	46	765.9	31.3

Nas Figuras 42, 43 e 44 está representada a relação entre o amortecimento e as temperaturas medidas in situ, de cada tipo de pavimento.

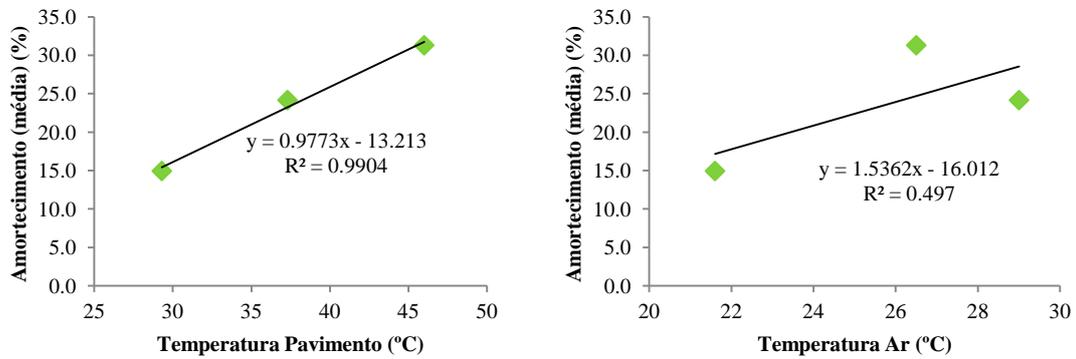


Figura 42 - Relação entre o amortecimento e a temperatura do ar e do pavimento clássico

Tabela 20 - Valores das frequências e do amortecimento do pavimento drenante

T ar (°C)	T pav. (°C)	Impedância Mecânica	
		Frequência (Hz)	Amortecimento (%)
21.8	17	2030.4	11.7
24.5	29.2	3043.3	12.4
32	48.1	688.6	48.0
31.1	49.3	567.6	56.4

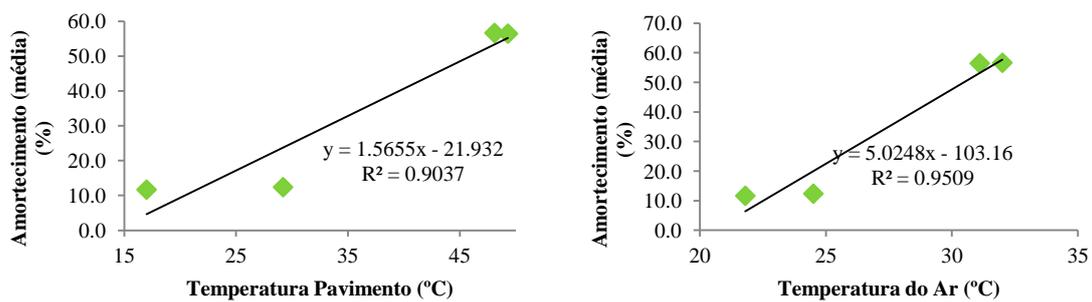


Figura 43 - Relação entre o amortecimento e a temperatura do ar e do pavimento drenante

Tabela 21 - Valores das frequências e do amortecimento do pavimento com borracha

T ar (°C)	T pav. (°C)	Impedância Mecânica	
		Frequência (Hz)	Amortecimento (%)
26	27.3	507.2	16.5
31	34.6	441.6	69.1
34	36.2	494.4	68.6
30.2	38.7	498.3	60.3

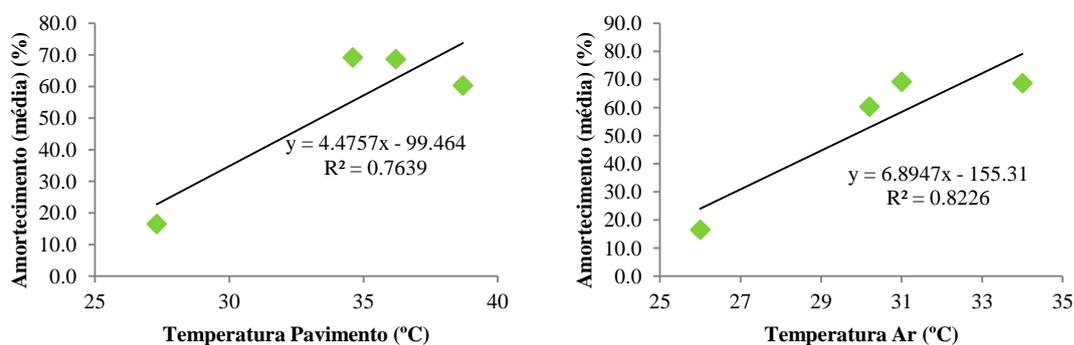


Figura 44 - Relação entre o amortecimento e a temperatura do ar e do pavimento com borracha

Os valores são aparentemente semelhantes a temperaturas baixas, contrariamente ao que acontece a temperaturas elevadas. O pavimento com borracha apresenta valores elevados, existindo uma discrepância em relação aos outros tipos de pavimentos. Este facto deve-se à inexistência de dados em determinada altura, por isso deve-se repetir o ensaio para confirmar a tendência com um intervalo mais alargado da temperatura. Seria aconselhável repetir os ensaios no Inverno, para verificar a tendência a temperaturas reduzidas.

4.5 Caraterização e análise dos resultados do ensaio de absorção

A partir do ensaio de absorção sonora realizado com o Tubo de Kundt adaptado obteve-se os resultados apresentados na Tabela 22 e na Figura 45 para cada pavimento.

No caso do pavimento drenante, o ensaio foi realizado em duas situações diferentes: colocando apenas o tubo sobre o pavimento e colocando o tubo sobre o pavimento mas a

área circundante tapada por uma placa, para evitar a fuga do som pelos poros comunicantes da mistura.

Tabela 22 - Valores da absorção de cada tipo de pavimento (bandas 1/3 oitava)

Frequência central (Hz)	Drenante		Clássico		Borracha	
	Sem placa	Com placa				
250	0.25	0.17	0.41	0.44	0.26	0.25
315	0.23	0.09	0.31	0.33	0.32	0.31
400	0.07	0.24	0.12	0.15	0.25	0.25
500	0.21	0.80	0.04	0.03	0.15	0.14
630	0.35	1.80	0.08	0.06	0.11	0.11
800	0.76	1.23	0.07	0.06	0.10	0.10
1000	1.16	1.37	0.06	0.05	0.09	0.09
1250	0.66	0.80	0.05	0.04	0.07	0.07
1600	0.27	0.37	0.01	0.01	0.10	0.11
2000	0.16	0.30	0.05	0.04	0.13	0.14
2500	0.04	0.20	0.15	0.10	0.23	0.22
Temperatura do Pavimento (°C)	49.3		23	46	33.1	38.7

Como se observa na Figura 45, o coeficiente de absorção é superior a 100%, significando que este ensaio não se adequa a pavimentos com porosidade muito elevada, como é o caso dos pavimentos drenantes.

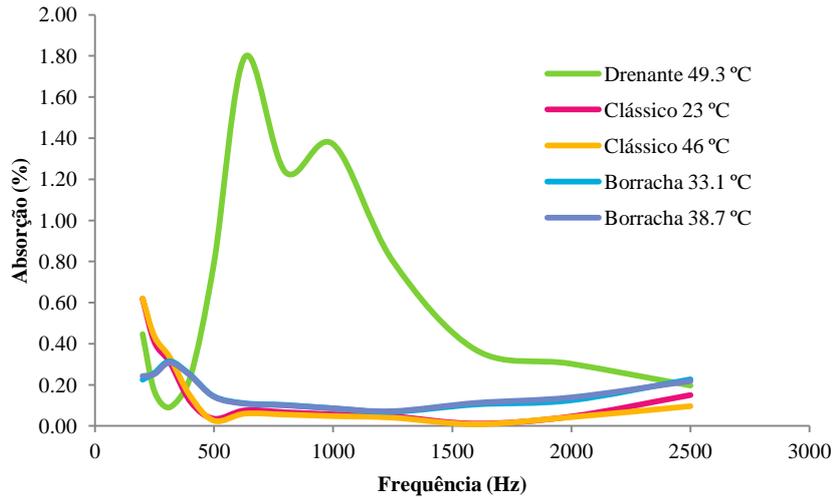


Figura 45 - Discrepância dos valores do betão betuminoso drenante, comparando com os outros tipos de pavimento

Para facilitar a análise dos resultados obtidos para o pavimento clássico e com borracha apresenta-se na Figura 46 a absorção em função da frequência central apenas para estes 2 pavimentos. Observa-se que a temperatura do pavimento não influencia os valores da absorção de nenhum dos tipos de pavimento em estudo. Além disso, comprova-se que o pavimento com borracha é o que mais absorve o ruído resultante da interação do pneu com o pavimento, estando entre os 7 e os 12%, dos 500 aos 1500 Hz. Em relação ao betão betuminoso clássico, esse é o que absorve menos, estando os 2 e os 7%, do 500 aos 1500 Hz, respetivamente. Verifica-se ainda que a frequências elevadas (>1000 Hz) a diferença entre os 2 espectros é superior. Este acontecimento pode ser resultado de haver mais porosidade no pavimento com borracha do que o pavimento clássico, fazendo com que haja maior absorção por parte desse tipo de pavimento.

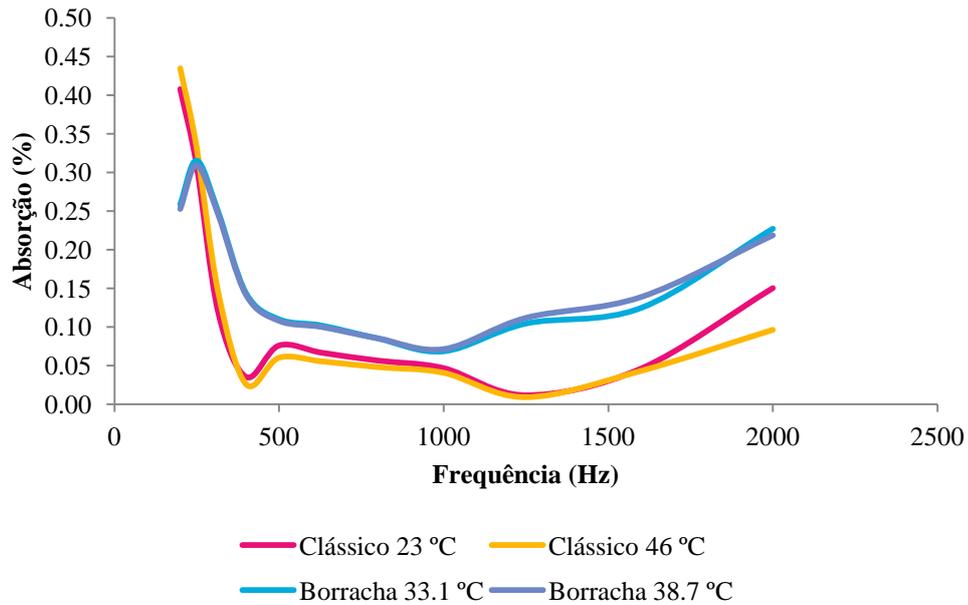


Figura 46 - Relação da absorção com o betão betuminoso clássico e o betão betuminoso com mistura de borracha a várias temperaturas

4.6 Relação entre o ruído pneu/pavimento e o amortecimento do pavimento

Para relacionar o amortecimento com o ruído da interação do pneu com o pavimento, foi necessário fazer a correção do mesmo, para as temperaturas do pavimento medidas aquando o amortecimento, uma vez que não foi possível realizar estes ensaios simultaneamente. Assim, foi utilizada a Equação 9, para fazer se obter o nível sonoro corrigido, estando os resultados apresentados na Tabela 23.

$$L_{eq\text{ corrigido}} = L_{eq} - (T_{Leq} - T_{amortecimento}) \times \alpha \quad (9)$$

Onde:

$L_{eq\text{ corrigido}}$ – Nível de pressão sonora corrigido;

T_{Leq} – Temperatura do pavimento medida aquando a medição do ruído;

$T_{amortecimento}$ – Temperatura medida aquando o amortecimento;

α – Coeficiente de correção, da correlação Temperatura do pavimento/Nível de pressão sonora;

L_{eq} – Nível de Pressão Sonora que se pretende corrigir.

Tabela 23 - Valores do Nível de Pressão Sonoro corrigidos

	T. amortecimento (°C)	Amortecimento (%)	T. Leq (°C)	Leq (dB(A))	α	Leqcorrigido (dB(A))
Drenante	17.0	12.78	19.6	100.11	0.0151	100.07
	29.2	18.55	32.8	98.48		98.43
	48.1	51.18	51.4	99.85		99.80
	49.3	56.43	47.1	100.64		100.68
Clássico	29.3	17.07	29.3	100.49	-0.0545	100.49
	37.3	25.74	37.3	100.10		100.10
	46.0	34.45	46	99.58		99.58
Borracha	27.3	17.60	26.3	96.52	0.0678	96.58
	34.6	62.38	33.5	97.56		97.64
	36.2	70.46	36.2	98.27		98.27
	39.0	59.24	38.7	96.83		96.85

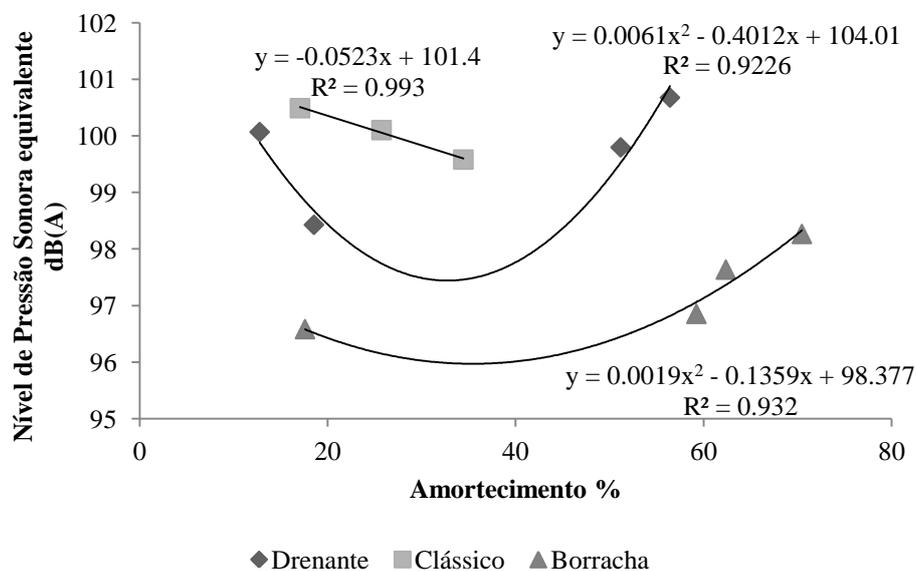


Figura 47 - Relação entre o amortecimento e o nível de pressão sonora

Perante os dados da Tabela 23 e da Figura 47, conclui-se que, cada tipo de pavimento estudado obtém resultados distintos. O betão betuminoso clássico, sendo o mais ruidoso é o que amortece menos, variando de, aproximadamente, 20% a 35%. O betão betuminoso com mistura de borracha, sendo o menos ruidoso, amortece entre 20 a 70%. O betão

betuminoso drenante, em relação ao nível de pressão sonora é o que varia mais, amortecendo entre os 10 a 60%. Estão ainda apresentadas as curvas que melhor se ajustam aos dados, o que sugere uma relação não linear com valores mínimos de ruído compreendidos entre cerca de 30% a 40% de amortecimento.

Seria importante repetir os ensaios para temperaturas reduzidas de forma a obter informação para temperaturas inferiores a 30°C, o que corresponde aproximadamente à falta de resultados de amortecimento compreendidos entre 20% e 50%.

4.7 Relação entre o ruído pneu/pavimento e a dureza do pneu

Na Tabela 24 estão apresentados os valores da dureza do pneu de ensaio, bem como a temperatura do pavimento e o nível de pressão sonora equivalente, correspondente a cada tipo de pavimento estudado.

Tabela 24 - Valores da dureza do pneu

Clássico			Borracha			Drenante		
T pav. (°C)	Leq (dB(A))	Dureza Pneu	T pav. (°C)	Leq (dB(A))	Dureza Pneu	T pav. (°C)	Leq (dB(A))	Dureza Pneu
23.7	100.24	65.8	27.3	96.56	65.0	29.2	100.11	65.5
24.2	99.53	65.7	34.6	97.56	64.9	49.3	103.84	63.9
29.3	100.49	65.3	36.2	98.27	64.5	47.1	100.64	64.4
37.3	100.10	64.4	38.7	96.83	64.4			
42.9	100.46	64.4						
46	99.58	64.3						

A relação entre a dureza do pneu e o nível de pressão sonora equivalente, pode ser verificada na Figura 48, onde se apresenta a reta de regressão nível de pressão sonora – dureza do pneu.

Verifica-se que o pavimento clássico não tem uma variação significativa ($R^2=0$).

Os pavimentos com borracha e drenante têm uma tendência decrescente, sendo a do primeiro inferior à do segundo, ou seja à medida que a variação da dureza do pneu aumenta o nível de pressão sonora equivalente diminui.

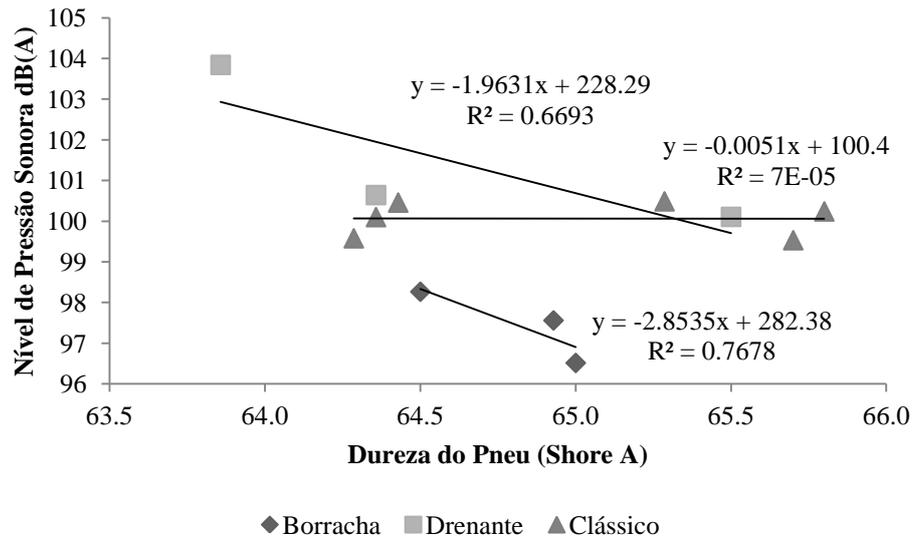


Figura 48 – Relação entre a dureza do pneu e o nível de pressão sonora equivalente

5. CONCLUSÕES

5.1 Conclusões Gerais

O ruído rodoviário resulta da combinação de vários sons, sons esses gerados pelos diversos veículos que circulam nas vias. Os fatores que influenciam o ruído são o ruído do funcionamento do veículo, o ruído aerodinâmico, e sobretudo o ruído proveniente de contacto entre os pneus e a superfície do pavimento, chamado ruído pneu/pavimento. Este último é, no entanto, um fenómeno complexo visto que depende de inúmeros fatores, tais como, a velocidade do veículo, a qualidade e textura da superfície da estrada, o comportamento dos condutores, a presença de água, e o tipo, tamanho, dureza e pressão do pneu.

As variáveis meteorológicas, tais como a temperatura, a velocidade do vento, e a direção do vento podem ser muito importantes relativamente à propagação do ruído gerado pelo tráfego rodoviário. Além destas variáveis, outras como, a chuva e a neve também podem afetar o desempenho das camadas superficiais bem como, influenciar os níveis de ruído. Contudo, a avaliação da influência destes fatores nos níveis de ruído carece de mais investigação. Neste contexto este trabalho contribuiu para aprofundar o estado dos conhecimentos no que diz respeito à influência da temperatura no ruído e nos principais parâmetros acústicos.

Neste estudo foram selecionados três trechos experimentais com pavimentos em betão betuminoso (designado de clássico), betão betuminoso drenante e mistura betuminosa aberta com betume modificado com borracha. Em cada um dos pavimentos foram efetuadas aquisições do ruído do contacto pneu-pavimento, in situ, recorrendo ao método da proximidade imediata (CPX). Além disso, foi medida a absorção do ruído e o amortecimento do pavimento, a temperatura e ainda a dureza do pneu.

A nível geral, conclui-se que, à medida que, a temperatura do ar e a temperatura do pavimento aumentam, o ruído diminui. Para a análise dos resultados optou-se por utilizar a temperatura do pavimento, devido a ser a temperatura que teve menores variações e picos ao longo do dia.

Assim este trabalho revelou que os pavimentos de betão betuminoso com mistura de borracha são os que apresentam menores níveis de ruído, sendo os pavimentos de betão betuminoso clássico a superfície mais ruidosa. Para além da superfície dos pavimentos, a velocidade mostrou ser uma das variáveis com maior efeito nos níveis de ruído gerados no contacto do pneu com o pavimento. O aumento da velocidade influencia o nível de pressão sonora, aumentando-o, em qualquer tipo de pavimento estudado.

Quanto à absorção do ruído pelo pavimento, o betão betuminoso com mistura de borracha também é o que apresenta maior absorção, na ordem dos 10%. O betão betuminoso clássico absorve cerca de 5% do ruído. No caso do betão betuminoso drenante não foi possível a sua avaliação, uma vez que se verificou que a técnica utilizada para o efeito não era aplicável a estes tipos de pavimentos. Quanto ao efeito da temperatura na absorção sonora, não se verificou diferenças entre medições, ou seja temperatura não influencia a absorção sonora do pavimento.

O pavimento de betão betuminoso com mistura de borracha é o que apresenta maior amortecimento, por exemplo para a temperatura de cerca de 35°C, é de 65%, enquanto que o betão betuminoso drenante e o betão betuminoso clássico, apresentam valores de cerca de 23%. De uma forma geral, à medida de a temperatura aumenta, o amortecimento também aumenta. Logo, a temperatura tem influência no amortecimento do pavimento. Quanto à relação entre o amortecimento e o ruído, o pavimento de betão betuminoso clássico apresenta valores de ruído mais elevados, para valores de amortecimento mais baixos, enquanto que os restantes apresentam valores mais altos para ruídos mais baixos.

Em relação aos resultados obtidos da dureza do pneu, conclui-se que o pavimento de betão betuminoso clássico não apresenta variação em relação ao nível de pressão sonora equivalente. Quanto aos restantes pavimentos estudados, têm tendência decrescente, ou seja, o nível de pressão sonora equivalente diminui quando a dureza do pneu aumenta. Em relação à temperatura do ar e do pavimento, conclui-se que a dureza do pneu diminui com o aumento da temperatura, tanto uma como outra.

5.2 Desenvolvimentos futuros

No seguimento do trabalho iniciado na presente dissertação, enumeram-se alguns aspetos a desenvolver futuramente com o objetivo de complementar o trabalho iniciado.

Tendo em conta que este estudo se apoiou em três tipos de pavimentos diferentes, betão betuminoso clássico, betão betuminoso drenante e mistura com borracha, este pode ser considerado o ponto de partida para um estudo mais aprofundado, com uma maior variedade de tipos de pavimentos, como por exemplo o SMA (Stone Mastic Asphalt), que se começa a utilizar em Portugal.

Como os resultados da avaliação do amortecimento, em relação à mistura com borracha, não foram claros, este estudo deve ser repetido e deve ser considerado um maior número de pavimentos diferentes na amostra, quer de borracha quer outro tipo.

O tipo de pneu também foi tido em conta, visto que foi utilizado um único tipo de pneu, sendo esse o mais usual em Portugal. Contudo, este trabalho também pode ser realizado com maior variedade de pneus. Como este trabalho foi um ponto de partida e para tornar mais robustas as conclusões aqui tiradas, deve ser feito um estudo mais alargado para outros tipos de pneus diferentes, por exemplo de maneira que abranja os pneus mais utilizados a nível internacional.

Como este estudo só foi feito para veículos ligeiros também seria interessante efetuar o estudo com veículos pesados.

Referindo também que, um dos aspetos fulcrais neste estudo foi a temperatura do ar e a do pavimento, em dias secos e com grande variação das temperaturas. Futuramente pode ser desenvolvido o mesmo trabalho, mas com dias de chuva (presença de água no pavimento).

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASTM D2240-00, Standard Test Method for Rubber Property—Durometer Hardness, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2002, www.astm.org

Anfosso-Lédée, F. e Pichaud, Y. Temperature effect on type-road noise. Bouguenais cedex, France : Section Acoustique Routière et Urbaine, LCPC centre de Nantes, 2007.

Antunes, M. L., et al. Avaliação do Ruído de Tráfego: Metodologia para a Caracterização de Camadas de Desgaste Aplicadas em Portugal. Portugal : Universidade do Minho. Escola de Engenharia, 2008.

Bendsten, H. State of the art of the low noise pavements, FEHRL. Lisbon, Portugal : s.n., 2007.

Bendtsen, H. e Andersen, B. Noise-Reducing Pavements for Highways and Urban Roads – State of the Art in Denmark. 2005.

Bendtsen, H., Lu, Q. e Kohler, E. Temperature Influence on Road Traffic Noise: Californian OBSI Measurement Study. California : University of California Pavement Research Center, 2010.

Bühlmann, Erik e Ziegler, Toni. Temperature effects on tyre/road noise measurements. 101A Thunstrasse, Bern CH-3006, Switzerland : Inter-noise, Osaka Japan, 2011.

Bueno, M., et al. Pavement temperature influence on close proximity tire/road noise. s.l. : Elsevier, 2011.

Cassolino, L.C e Pereira, A.H.A. Amortecimento: Classificação e Métodos de determinação. São Carlos, Brasil : ATCP Engenharia Física, 2010.

Cesbron, Julien e Anfosso-Ledée, Fabienne. A Characterization Method of Road Stiffness for Tyre/Road Noise. Rio de Janeiro, Brazil : Rio inter-noise, 2005.

CNOSSOS. Technical advice on the preparation of the common European assessment methods to be used by the EU Member States for strategic noise mapping after adoption as specified in the Directive 2002/49/EC. 2010.

Costa, Eduardo. Acústica Técnica. São Paulo: Edgard Blücher, 2003.

Cunha, C.A.C. 2013. Perceção de ruído de tráfego rodoviário. Dissertação do mestrado. Universidade do Minho. Guimarães, 2013.

Descornet, G. e Goubert, L. Noise Classification of Road Pavements, Task 1: technical background information 1, Draft report 05. European Commission : Directorate-General Environment, 2006.

Descornet, G., et al. Traffic noise and Road Surfaces: States of the Art. Belgian Road : Report for SIRUUS project, 2000.

DL. Decreto-Lei n.º 9/2007, de 14 de Janeiro. Regulamento Geral de Ruído. Portugal : Diário da República - 1ª série, p. 389-398, 2007.

EC. ‘QCITY’ and ‘SILENCE’ – EU projects target urban noise. [Online] 2012. [Citação: 21 de 02 de 2014.] http://ec.europa.eu/research/transport/projects/items/_qcity__and__silence____eu_projects_target_urban_noise_en.htm.

Ewins. Modal Testing: Theory, Practice and Application, Research Studies Press Ltd. UK., 2000.

FEHRL. Guidance Manual for the Implementation of Low-Noise Road Surfaces. Brussels, Belgium : s.n., 2006.

FEHRL. SILVIA, Sustainable road surfaces for traffic noise control. 2006.

Ferreira, O.M. Caracterização do ruído pneu-pavimento dos pavimentos rodoviários. Engenharia Civil, Universidade do Minho. 2010.

Freitas, E. Gestão da Velocidade e do Ruído Rodoviário. Seminário. Universidade do Minho, Guimarães. 2012.

Freitas, E.F. e Machado, P.C., Freitas, C.P. Avaliação e modelação do ruído de contato pneu-pavimento. VIII Congresso Ibero-americano de Acústica. Évora - Portugal : s.n., 2012. pp. 1-10.

Freitas, E.F., Paulo, J. e Coelho, J.L.B. Avaliação do desempenho acústico de pavimentos rodoviários. Coimbra, Portugal : Acústica 2008, 2008. p. 11.

Freitas, E.F., Santos, A.P.S. e Santos, L.P. Estudo do efeito do tipo de pneu na geração de ruído rodoviário. 2008.

Freitas, Elisabete F., et al. A Influência da Água no Ruído Produzido pelo Tráfego Rodoviário. Engenharia Civil, Universidade do Minho. Braga, 2006. pp. 5-15.

Freitas, Elisabete, et al. Superfícies de baixo ruído com materiais inovadores. Guimarães, 2012.

Freitas, Elisabete, Machado, Pedro e Raimundo, Isaac. Caracterização do ruído pneu-pavimento nas estradas portuguesas. Braga, 2012.

Gardete, D. C. Comparação de ensaios laboratoriais para a caracterização de misturas betuminosas à deformação permanente. Coimbra : Universidade de Coimbra, 2006.

Haider, Manfred e Descornet, Guy. Silence. Noise classification methods for urban road surfaces. s.l. : European Commission DG research, 2006.

Hamet, J. F., et al. Road Profile Textura and Tire Noise. Nantes : Pavement Surface Characteristic. IV th International Symposium – SURF 2000, 2000.

Hanson, D., Donovan, P. e James, R. Tire/Pavement Noise Characteristics of HMA Pavements. s.l. : Symposium, 2005.

HARMONOISE. Work Package 1.1 - Source modelling of road vehicles. 2003.

IA. Instituto do Ambiente. O ruído e a cidade. Tradução a partir do original francês: Le Bruit et la Ville. (1978). Ministère de l'Équipement et de l'Aménagement du Territoire. Paris, 2004.

Inácio, O., et al. Avaliação do desempenho acústico de dispositivos de redução do ruído de tráfego. Dissertação de Mestrado. Belém, Brasil : Sobrac. 2012.

Inácio, Octávio, et al. Avaliação do desempenho acústico de dispositivos de redução do ruído do tráfego. Dissertação de Mestrado da Universidade do Minho. Braga

ISO/DIS11819-2. Acoustics – Method for Measuring the Influence of Road Surfaces on traffic noise – Part 2: The Close Proximity Method. Geneve, Switzerland : International Organisation for Standardisation (ISO), 2012.

ISO11819-1, N. Acoustics – Method for Measuring the Influence of Road Surfaces on Traffic Noise – Part 1: Statistical Pass-By Method. Geneve, Switzerland : International Organisation for Standardisation (ISO), 1997.

Jabben, J. Temperature effects on road traffic noise measurements. Bilthoven, The Netherlands : National Institute for Public Health and Environment (RIVM), 2011.

Kuijpers, A. e Blokland, G. Van. Tyre/Road Noise Models in the Last Two Decades: a Critical Evaluation. The 2001 International Congress and Exhibition on Noise Control Engineering. Hague. Netherlands : s.n., 2001.

Lamancusa, J. S. Noise Control. Outdoor sound propagation. 2009.

Licitra, G., et al. Road pavement description by psycho-acoustical parameters from CPX data, Inter-noise 2009. Ottawa, Canada : s.n., 2009.

Loon, R.V. Stille wegdekken in kaart gebracht met de CPX-methode, raadgevende ingenieurs, Vught. [Online] 2008. [Citação: 20 de 02 de 2014.] <http://www.geluidnieuws.nl/2008/thema/vanloon.html>.

Lopes, J.M.L. Estudo da influência da superfície dos pavimentos na produção de ruído rodoviário. Dissertação de Mestrado. Universidade do Minho. Guimarães , 2007.

Mateus, Diogo. Acústica de edifícios e controlo de ruído. Dissertação de Mestrado, 2008.

McDade, A., et al. Impacto das camadas superficiais dos pavimentos nos mapas de ruído - Casos de estudo. Évora, Portugal : VIII Congresso Ibero-americano de Acústica, 2012.

Mendes, Susana Ferreira. Caracterização mecânica de misturas betuminosas a aplicar em infra-estruturas de transportes. Lisboa : Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2011.

Mendonça, C. Noise perception, psychoacoustic indicators, and traffic noise. Guimarães : Gestão da velocidade e do ruído rodoviário, 2012.

Neves, J. M. e Correia, A. G. Caracterização da rigidez de misturas betuminosas em ensaios de tracção indirecta por compressão diametral de provetes cilíndricos. Guimarães : Publicação nº26. Universidade do Minho, 2006.

OECD. Roadside Noise Abatement, Organisation for Economic Co-operation and Development Publications. Paris : s.n., 1995.

Ostergaard, P.B. Physics of Sound and Vibration, The Noise Manual. American Industrial Hygiene Association. 2003. pp. 19-39.

Pereira, P. e Picado-Santos, L. Pavimentos Rodoviários. Braga, Portugal : Editado por Paulo Pereira e Luís Picado Santos, 2002.

Philips, S., Waters-Fuller, T. e Balsom, M. Factors Affecting Statistical Pass-By Measurements. Christchurch, New Zeland : s.n., 1998.

Pucher, E., et al. Recommendations on Specifications for Tyre and Vehicle Requirements. s.l. : Silvia Project Deliverable, 2006.

Raitanen, N. Measuring of Noise and Wearing of Quiet Surfaces. Finland : Dissertation for the degree of Doctor, 2005.

RECIPAV. Características das misturas. [Online] 1999. [Citação: 28 de Fevereiro de 2014.] <http://www.recipav.pt/artigo.php?id=12&sid=12&artid=8>.

RENAULT. Clube.com. Tudo sobre pneus. [Online] 17 de 7 de 2008. [Citação: 26 de 02 de 2014.] <http://www.renaultclube.com/tudo-sobre-pneus/>.

Sainio, P. NOTRA – Noise Trailer in Pavement Evolution Measurements. s.l. : Helsinki University of Technology, 2003.

Sandberg, U e Ejsmont, J.A. Tyre/Road Noise Reference Book. Kisa, Sweden : Informex, SE-59040, 2002.

Santos, A. P. S., Freitas, E. F. e Santos, L. P. Estudo da eficácia dos pavimentos drenantes na redução do ruído rodoviário para as condições seco e molhado. Estoril, Portugal : Congresso Rodoviário Português: estrada. 2006.

Sanz, John. Evaluación del Ruido de Rodadura en Carreteras. UCLM, Ciudad Real, 2006.

Silva, L.T. Qualidade do Ambiente Construído. Documento de Apoio, Universidade do Minho. Braga, 2012.

Tijs, E.H.G. Study and development of an in situ acoustic absorption measurement method, PhD thesis. Enschede, The Netherlands : University of Twente, 2013.

Wayson, R. NCHRP - Synthesis of Highway Practice 268, Relationship Between Pavement Surface. 1998.

WHO. Burden of disease from environmental noise. Quantification of healthy life years lost in Europe. [Online] 2011. [Citação: 18 de 02 de 2014.] http://www.who.int/quantifying_ehimpacts/publications/e94888/en/.