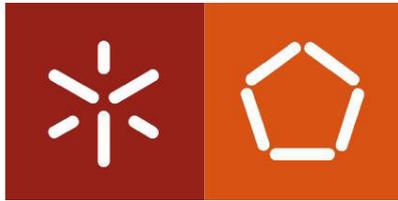




Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Catarina Araújo Cupertino da Cunha

Perceção de ruído de tráfego rodoviário



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Catarina Araújo Cupertino da Cunha

Perceção de ruído de tráfego rodoviário

Dissertação de Mestrado
Mestrado Integrado em Engenharia Civil

Trabalho efetuado sob a orientação da
Professora Doutora Elisabete Fraga de Freitas
e do Professor Doutor Jorge Almeida Santos

Novembro de 2013

AGRADECIMENTOS

O trabalho desenvolvido no âmbito desta dissertação resulta da colaboração entre o Departamento de Engenharia Civil e o Laboratório de Visualização e Perceção do Centro de Computação Gráfica da Universidade do Minho, mas também da contribuição de um conjunto de pessoas. O que resulta destes meses de trabalho reflete-se não só nas horas despendidas, mas também nas pessoas que participaram ativamente no projeto ou simplesmente me transmitiram força e apoio nos momentos de maior fraqueza.

Assim, de forma reconhecida e sincera agradeço,

À Professora Doutora Elisabete Fraga de Freitas, pela participação ativa em todas as fases do projeto, pela disponibilidade e apoio, pelos ensinamentos e motivação transmitida, e por me fazer sentir, em todos os momentos, que fiz a escolha certa.

Ao Professor Doutor Jorge Almeida Santos, pela forma como me recebeu no CCG, pelo acompanhamento, motivação, e pelos conhecimentos transmitidos, dando-me a conhecer um pouco de uma área até aqui desconhecida, a psicologia experimental.

Ao Hélder Torres, técnico do laboratório de Vias de Comunicação, colega e amigo, pela indispensável colaboração e apoio nos ensaios de campo, e por estar sempre presente nos momentos necessários.

Ao João Lamas, pelo tempo despendido em prol deste trabalho, pela simpatia e paciência com que me foi recebendo, pelo apoio e confiança, e por todos os conhecimentos que me transmitiu, contribuindo de forma essencial neste trabalho.

Aos investigadores do Laboratório de Visualização e Perceção, pela colaboração nas tarefas, pelo apoio e simpatia, fazendo-me sentir sempre bem recebida.

Aos colegas e amigos que estiveram do meu lado durante este percurso académico, em especial à Cláudia, pela amizade, disponibilidade e apoio constante; à Sara, pela motivação e companheirismo; à Cátia, pelos momentos passados, pelas parcerias de estudo e trabalho

perfeitas, e pela extraordinária pessoa que é; e ao meu braço direito destes últimos cinco anos, a Ariana, que nos bons e maus momentos sempre me fez sentir grata pela sua amizade.

Aos meus pais, pela confiança que sempre depositaram em mim, pelo apoio incondicional, pelos princípios e valores que sempre me foram transmitindo, e pelo exemplo que são, demonstrando sempre que nada nesta vida se consegue sem esforço e trabalho.

Ao meu irmão, por me mostrar a Engenharia Civil como um possível caminho a seguir, pela força e confiança que me transmite, e por estar sempre do meu lado demonstrando o orgulho que tem em mim.

Por ultimo, à minha avó, por ser um modelo a seguir, pela sua companhia e amizade, e pelas suas histórias que, apesar de me distraírem nas tardes de estudo e trabalho, conseguem sempre dar-me forças e fazer sorrir.

PERCEÇÃO DE RUÍDO DE TRÁFEGO RODOVIÁRIO

Resumo

O ruído do tráfego rodoviário é um dos principais contribuintes para o ruído ambiental, podendo causar consideráveis impactes na saúde pública e qualidade de vida das populações. No entanto, o ruído rodoviário levanta várias questões pois, se por um lado está associado a vários problemas de saúde e bem-estar, por outro lado 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.

O trabalho desenvolvido nesta dissertação tem por objetivo estudar as características acústicas de vários pavimentos rodoviários, sob o ponto de vista da psicoacústica, com recurso à metodologia de aquisição do ruído pneu-pavimento em contínuo, o método CPX, sendo por isso uma abordagem inovadora com vantagens metodológicas importantes.

Este trabalho apresenta, para oito tipos de pavimento diferentes, a sua caracterização acústica através de três indicadores acústicos (L_{Amax} , L_{Aeq} e loudness) em função da velocidade de circulação. Cada variável foi relacionada com as respostas de avaliação da intensidade sonora de indivíduos submetidos aos ruídos adquiridos.

A análise dos resultados é apresentada sob três abordagens, a análise das variáveis acústicas dos ruídos adquiridos, a análise dos resultados da tarefa de avaliação da intensidade do ruído pneu-pavimento e a análise dos diferentes modelos de cálculo do indicador psicoacústico loudness. Verificou-se que os níveis de ruído aumentam significativamente com a velocidade, e que os pavimentos não betuminosos são os mais ruidosos, particularmente os cubos de granito. Quanto às superfícies dos pavimentos com camada de desgaste em mistura betuminosa, o microaglomerado betuminoso destaca-se com os níveis de ruído superiores. Relativamente aos indicadores acústicos, o loudness mostrou ser o que melhor se ajusta às respostas de intensidade, sendo o Loudness CF o modelo de cálculo que melhor explica as respostas dos indivíduos inquiridos.

Palavras-chave: Ruído, Incómodo, Interação Pneu-Pavimento, Método CPX, Loudness

PERCEPTION OF ROAD TRAFFIC NOISE

Abstract

The road traffic noise is one of the major contributors to environmental noise, which can cause considerable impacts on public health and quality of life of populations. However, road noise raises several questions because, if on one hand is associated with several health problems and welfare, on the other hand their lack constitutes a risk to the safety of road users. Thus, it becomes essential the study and the acoustic evaluation of road pavements, since their surface characteristics actively influence the generation mechanisms of tire-pavement noise.

The work in this thesis aims to study the acoustic characteristics of several road surfaces, from the point of view of psychoacoustics, using a methodology to acquire continuously the tire-pavement noise, the CPX method, so it is an innovative approach which leads to important methodological advantages.

This work presents the acoustic characterization of eight different types of pavement by using three acoustic indicators (L_{Amax} , L_{Aeq} and loudness) as a function of speed. Each variable was related to the sound intensity evaluation responses of individuals subjected to the acquired noise.

The results analysis was done according to the following three approaches: analysis of acoustic variables of the acquired noises, analysis of the results of the tire-pavement noise intensity assessment task, and the analysis of different models to calculate the psychoacoustic indicator - loudness. It was found that noise levels significantly increase with speed, and not bituminous pavements are the noisiest, specially the ones made of granite cubes. Regarding the pavements surfaces with bituminous mixtures, the micro surfacing asphalt paving stands out with higher noise levels. Regarding the acoustic indicator, loudness proved to be the best fit to the responses of intensity, and the calculation model Loudness CF is the best explaining the responses of the inquired individuals.

Key words: Noise, Annoyance, Tire-pavement interaction, CPX Method, Loudness

ÍNDICE GERAL

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Enquadramento	1
1.2. Objetivos	3
1.3. Organização da dissertação	4
2. ACÚSTICA RODOVIÁRIA.....	5
2.1. Princípios básicos da acústica.....	5
2.2. Efeitos do ruído no ser humano	8
2.3. Indicadores de ruído.....	9
2.4. Indicadores Psicoacústicos	11
2.4.1. Loudness	11
2.4.2. Roughness	14
2.4.3. Sharpness	15
2.5. Geração do ruído rodoviário	15
2.6. Propagação do ruído rodoviário.....	17
2.7. Métodos de avaliação do ruído	18
2.7.1. Método estatístico de passagem (SPB).....	19
2.7.2. Método de passagem controlada (CPB).....	20
2.7.3. Método da proximidade imediata (CPX).....	21
3. FATORES QUE INFLUENCIAM O RUÍDO DO TRÁFEGO	25
3.1. Veículos	25
3.1.1. Tipo de veículo	25
3.1.2. Tipo de pneu	27
3.1.3. Velocidade	30
3.2. Pavimentos.....	31
3.3. Condições climatéricas	36
3.4. Comportamento dos condutores	37
4. DETECÇÃO E INCÓMODO DO RUÍDO DO TRÁFEGO	39
4.1. Princípios básicos	39
4.2. Fatores que afetam a detecção e a incomodidade.....	39
4.2.1. Influência da idade dos indivíduos	40

4.2.2.	Influência do ruído de fundo	41
4.3.	Deteção de veículos versus incomodidade	43
4.4.	Desenvolvimento de alternativas para redução do ruído.....	44
5.	PERCEÇÃO DE RUÍDO DE TRÁFEGO RODOVIÁRIO	47
5.1.	Considerações gerais	47
5.2.	Aquisição do ruído contacto pneu-pavimento.....	47
5.3.	Processamento e análise de dados	51
5.4.	Avaliação da percepção da intensidade do ruído pneu-pavimento	56
6.	ANÁLISE DOS RESULTADOS	61
6.1.	Método de Proximidade Imediata	61
6.1.1.	Indicadores acústicos e psicoacústicos do ruído dos diferentes tipos de pavimento em função da velocidade.....	61
6.1.2.	Relação entre os indicadores	66
6.2.	Avaliação da intensidade do ruído pneu-pavimento	68
6.2.1.	Média das respostas	71
6.2.2.	Desvio Padrão dos resultados.....	73
6.3.	Correlação dos modelos de loudness com as respostas de intensidade.....	75
6.4.	Correlação das respostas de intensidade com L_{max} , e L_{eq}	78
7.	CONCLUSÕES	83
7.1.	Conclusões gerais	83
7.2.	Desenvolvimentos futuros.....	85
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	87

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Parâmetros físicos do som.....	5
Figura 2 – Escala dos níveis de pressão sonora (adaptado de http://www.m-almada.pt)	6
Figura 3 – Curvas de ponderação de frequências (http://www.solerpalau.pt).....	7
Figura 4 – Gravidade dos efeitos do ruído na saúde e número de pessoas afetadas (WHO, 2011).....	8
Figura 5 – Relação entre o loudness (sones) e o nível de loudness (phons).....	13
Figura 6 – Contornos de igual loudness (curvas a vermelho) e curva padrão ISO original (azul) para 40 phons (ISO 226:2003)	13
Figura 7 – Exemplos de mecanismos de geração mecânica da interação pneu-pavimento: Vibração radial causada pela interação bloco do piso-pavimento (a); Movimento aderência-deslize dos blocos no pavimento (b); Aderência entre os blocos e o pavimento na saída da zona de contacto (c) (Sandberg e Ejsmont, 2002)	16
Figura 8 – Exemplos de mecanismos de geração aerodinâmica da interação pneu-pavimento: Bombeamento do ar a sair e a entrar da zona de contacto (a e b); Amplificação sonora causada pelo órgão de tubos e a geometria de ressonador de Helmholtz dentro da trajetória de contacto (c); Ressonância acústica no espaço de ar no interior do pneu (d) (Sandberg e Ejsmont, 2002)	16
Figura 9 – Configuração da metodologia de aquisição de ruído pelo método SPB (Freitas et al., 2008c).....	20
Figura 10 – Sistemas de aquisição da metodologia CPX (Loon, 2008) (http://www.highfrictionroads.com).....	21
Figura 11 – Posição dos microfones para as medições, e respetivas distâncias (ISO/DIS 11819-2, 2012)	22
Figura 12 – Representação dos níveis de ruído do motor, da interação pneu-pavimento, e total para veículos ligeiros e pesados em função da velocidade (Bendtsen, 2008).....	26
Figura 13 – Formato do rótulo e classes de ruído exterior de rolamento (CE, 2009)	27
Figura 14 – Pneus candidatos a substituir o pneu ISO A (Morgan et al., 2009)	29
Figura 15 – Pneus candidatos a substituir o pneu ISO D (Morgan et al., 2009)	29
Figura 16 – Variação dos valores de L_{max} , para quatro veículos diferentes, com o aumento da velocidade (Antunes et al., 2008)	31
Figura 17 – Exemplos de pavimentos em cubos de granito (a), blocos de cimento (b) e cubos de calcário (c) (http://www.alvestone.com)	32
Figura 18 – Níveis sonoros, com ponderação A, de vários tipos de pavimento (Sandberg e Ejsmont, 2002)	34

Figura 19 – Definição do tipo de textura em função do comprimento de onda e da frequência espacial [adaptado de (Domenichi et al., 1999)]	35
Figura 20 – Comparação dos níveis de L_{Amax} de diferentes velocidades, em condições de aceleração e de velocidade constante (Pucher et al., 2006)	37
Figura 21 – Percentagem da deteção média por pavimento e faixa etária (Mendonça et al., 2013)	41
Figura 22 – Percentagem média de deteção com diferentes níveis de ruído de fundo para os diferentes grupos etários (Mendonça et al., 2013)	42
Figura 23 – Exemplos de barreiras acústicas (Bragança et al., 2006)	44
Figura 24 – Pavimentos escolhidos para as aquisições	48
Figura 25 – Pneu ContiEcoContact3 195/65-R15	49
Figura 26 – Posição dos microfones para a medição pelo método CPX (ISO/DIS 11819-2:2012)	50
Figura 27 – Carrinha e atrelado com todo o esquema de montagem dos microfones e da plataforma Pulse	50
Figura 28 – Radar de velocidade do tipo pistola (a), Termómetro infravermelho de pistola (b), Anemómetro de fluxo digital (c)	51
Figura 29 – HATS com os simuladores de orelha	52
Figura 30 – Curva de loudness específico de um sinal acústico, expresso em sone/Bark e em função de Bark (Schlittenlacher et al., 2012)	54
Figura 31 – Representação gráfica do loudness específico (expresso em sone/bark) médio obtido pelo modelo Loudness CF	55
Figura 32 – Curva de loudness (expresso em sone) obtido pelo modelo Loudness MGB	56
Figura 33 – HATS com os Headphones para a calibração da aplicação Noiseless Player	57
Figura 34 – Set-up experimental	58
Figura 35 – Esquema da tarefa de classificação da intensidade	59
Figura 36 – Gráfico da variação do L_{Amax} com a velocidade para cada pavimento	63
Figura 37 – Gráfico da variação do L_{Aeq} com a velocidade para cada pavimento	64
Figura 38 – Gráfico da variação do loudness com a velocidade para cada pavimento	65
Figura 39 – Relação entre os indicadores numa escala normalizada	66
Figura 40 – Relação entre os pavimentos numa escala normalizada, para os diferentes indicadores	67
Figura 41 – Média das respostas dos sujeitos 1 e 2 para os oito pavimentos em função da velocidade	70

Figura 42 – Média das respostas do sujeito 1 para os oito pavimentos às quatro velocidades praticadas.....	71
Figura 43 – Média das respostas do sujeito 2, para os oito pavimentos, às quatro velocidades praticadas.....	72
Figura 44 – Média das respostas dos dois sujeitos.....	72
Figura 45 – Desvio Padrão obtido nas respostas do sujeito 1.....	73
Figura 46 – Desvio Padrão obtido nas respostas do sujeito 2.....	74
Figura 47 – Desvio Padrão das respostas dos dois sujeitos.....	75
Figura 48 – Relação entre loudness e a avaliação da intensidade.....	77
Figura 49 – Relação entre loudness (MGB) e a avaliação da intensidade.....	77
Figura 50 – Relação entre L_{Amax} e a avaliação da intensidade.....	78
Figura 51 – Relação entre L_{Amax} e a avaliação da intensidade, com a distinção entre pavimentos.....	79
Figura 52 – Representação das linhas de tendência dos materiais que se agrupam.....	79
Figura 53 – Relação entre L_{Aeq} e a avaliação da intensidade.....	80
Figura 54 – Relação entre L_{Aeq} e a avaliação da intensidade, com a distinção entre pavimentos.....	80
Figura 55 – Representação das linhas de tendência dos materiais que se agrupam.....	81

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Temperaturas obtidas nos diferentes trechos com pavimento de mistura betuminosa.....	61
Tabela 2 – Níveis de pressão sonora e loudness para cada tipo de pavimento e velocidade de circulação.....	62
Tabela 3 – Médias e desvios padrão resultantes das tarefas de avaliação da intensidade	69
Tabela 4 – Resultados de loudness calculados pelos dois modelos em análise.....	76

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento

A poluição sonora é um importante e atual problema em vários países industrializados, em especial em áreas urbanas, sendo que na Europa os seus impactes na saúde são uma crescente preocupação, pois estima-se que mais de 90 milhões de pessoas sofrem com níveis de ruído intoleráveis (EC, 2012). Especialistas em saúde pública concordam que os riscos ambientais constituem 25% da carga de doenças, sendo que uma elevada contribuição deve-se à exposição ao ruído proveniente de indústrias, ferrovias, aeroportos, e em particular do tráfego rodoviário (WHO, 2011). Neste contexto é importante que as indústrias de transportes e estradas, e as autoridades públicas de saúde e de trânsito tenham uma atitude ativa no sentido de solucionar este problema (Mendonça et al., 2013).

Segundo a Organização Mundial de Saúde (World Health Organization (WHO)), uma em cada três pessoas sente-se irritada durante o dia, e uma em cada cinco sofre perturbações no sono durante a noite devido ao ruído provocado pelo trânsito. De algum modo todas as pessoas são afetadas pelo ruído, o que pode causar impactes consideráveis na qualidade de vida (Kloth et al., 2008), desde problemas de saúde até à irritabilidade emocional. A definição de saúde, segundo a OMS é um “estado de completo desenvolvimento físico, mental e bem-estar social e não meramente a ausência de doença ou enfermidade” (Scliar, 2007), logo, a poluição sonora, para além de um incómodo ambiental, deve ser considerado um problema de saúde pública (WHO, 2011).

Apesar de todos os problemas associados à existência do ruído do tráfego, a falta deste constitui um risco para a segurança dos utilizadores da estrada, em particular os peões e ciclistas (Sandberg, 2012). Nos últimos anos são vários os estudos e ações realizados no sentido de reduzir o ruído dos transportes, nomeadamente com o desenvolvimento de pavimentos de baixo ruído e de veículos híbridos ou elétricos. Este avanço na redução do ruído rodoviário tem levantado várias questões relacionadas com a segurança. A produção de baixos níveis de ruído interfere particularmente com a segurança dos deficientes visuais, pois estes dependem dos sons para detetar veículos em aproximação. Esta questão surgiu inicialmente em 2008 nos Estados Unidos através das queixas efetuadas pela Federação Nacional de Cegos (National Federation

of the Blind – NFB) o que levou à aplicação de leis que exigem a utilização de sistemas de alerta (Audible Vehicle Alerting Systems – AVAS) em veículos híbridos e elétricos (Sandberg, 2012).

No entanto, é controverso que a redução do ruído proveniente dos veículos e pavimentos contribua para a sinistralidade. Se por um lado há quem defenda que menos ruído é a causa de vários acidentes, por outro lado, há vários estudos que não conseguiram mostrar tais relações (Sandberg, 2012). Quanto aos sistemas de alerta (AVAS), apesar de alguns países defenderem a sua utilização a fim de aumentar os níveis de deteção, Sandberg (2012) defende que a melhor maneira de promover a segurança e a saúde é, não a adição de som nos veículos silenciosos, mas sim a redução dos limites máximos de ruído, pois o problema não está no facto dos veículos ficarem silenciosos, mas sim no seu mascaramento por parte do ruído de fundo.

São vários os estudos já realizados com inquéritos para a avaliação dos níveis de deteção e incómodo de veículos, porém existem poucos baseados em ensaios experimentais. Além disso, muitos dos estudos que abordam o incómodo têm em conta as características do tráfego, deixando de parte a influência do tipo de superfície da estrada (Freitas et al., 2012b). Alguns autores (Barton et al., 2012) defendem ainda que comportamentos dos peões que podem afetar a segurança, como a deteção e o processamento da informação auditiva, ainda não foram estudados com a devida atenção.

No âmbito do ruído urbano foram desenvolvidos dois importantes projetos europeus, o Silence e o QCity. O projeto Silence forneceu metodologias e tecnologias indispensáveis para o controlo eficiente do ruído causado por transportes urbanos rodoviários e ferroviários, estratégias inovadoras para planos de ação de redução do ruído de transportes urbanos e ferramentas práticas para a sua implementação (Kloth et al., 2008). O projeto Qcity (Quiet City Transport) desenvolveu uma infraestrutura tecnológica integrada para o controlo eficiente do ruído ambiente proveniente dos transportes (viário e ferroviário), considerando a atenuação do ruído gerado na fonte, tanto a nível do veículo como da infraestrutura (QCity, 2008). Contudo, ainda há um longo caminho a percorrer, nomeadamente na avaliação das diferentes camadas de desgaste e o seu impacto no ambiente e populações, e na redução do ruído na fonte, pois a utilização de pavimentos e veículos mais silenciosos ainda não é prática usual em vários países da Europa.

O ruído do tráfego automóvel é portanto um importante e essencial alvo de estudo, pois por um lado está associado a problemas de saúde e bem-estar, mas por outro pode dizer-se que tem uma função preventiva, e pode evitar situações de maior risco ou perigo.

Nesta dissertação procurar-se-á obter os níveis de pressão sonora gerados por diferentes pavimentos, quando estão em contacto com os pneus de um veículo em movimento. A partir de aquisições sonoras feitas pelo método CPX, obtém-se o ruído pneu-pavimento de modo contínuo ao longo de um trecho, as quais permitem, além da pressão sonora, calcular os indicadores psicoacústicos a eles associados. Desta forma é possível perceber melhor qual a influência do ruído rodoviário nos indivíduos.

1.2. Objetivos

Este estudo tem como base o projeto Noiseless, que teve como objetivo a perceção, modelação e redução do ruído através de superfícies de pavimentos inovadoras e duráveis, e pretende ser a sua continuação. Este insere-se nas atividades desenvolvidas pelo Departamento de Engenharia civil e o Laboratório de Visualização e Perceção da Universidade do Minho.

O objetivo geral é aplicar uma técnica de medição do ruído em contínuo, mais fácil, eficaz e económica, para avaliar a incomodidade causada por um conjunto de pavimentos diferentes em indivíduos. Para tal é necessário efetuar estudos experimentais e analíticos, definindo-se desta forma quatro objetivos gerais:

- Atualização do estado de conhecimento através do estudo bibliográfico de documentos e investigações efetuadas no âmbito do ruído rodoviário;
- Estudo do ruído gerado por oito tipos de pavimentos rodoviários de modo contínuo, através do desenvolvimento da metodologia CPX;
- Cálculo e análise dos indicadores acústicos L_{Amax} e L_{Aeq} , e do indicador psicoacústico loudness do ruído pneu-pavimento;
- Avaliação da intensidade do ruído rodoviário com recurso à tarefa experimental efetuada a sujeitos voluntários.

1.3. Organização da dissertação

De forma a enquadrar os diferentes assuntos e fases do trabalho, esta dissertação encontra-se organizada em sete capítulos.

O primeiro capítulo corresponde à introdução, na qual se encontra o enquadramento e a pertinência do estudo do ruído rodoviário, e os objetivos da realização deste trabalho.

Os capítulos dois, três e quatro fazem parte do estado do conhecimento, isto é, apresenta informações e estudos relevante no âmbito do tema. Nestes capítulos são abordados e discutidos os principais conceitos da acústica, os fatores que influenciam a geração do ruído rodoviário, e fatores associados a este, como a deteção e o incómodo.

O quinto capítulo descreve metodologias, procedimentos e materiais adotados no decorrer do trabalho, desde a aquisição do ruído pneu-pavimento, o tratamento e análise dos ficheiros acústicos, e a tarefa de avaliação da intensidade dos estímulos sonoros.

No sexto capítulo é apresentada a análise dos resultados obtidos. Neste encontram-se os resultados das aquisições realizadas pelo método de proximidade imediata, o que resultou das tarefas de avaliação da intensidade do ruído pneu-pavimento, a correlação das respostas com L_{Amax} , L_{Aeq} e loudness, e por ultimo a comparação dos modelos de loudness do software PsySound3. Para uma melhor perceção e leitura dos resultados estes são apresentados sob a forma de tabelas e gráficos.

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

2. ACÚSTICA RODOVIÁRIA

2.1. Princípios básicos da acústica

O som, ou vibração acústica é uma variação da pressão atmosférica que se propaga, sob a forma de ondas mecânicas, e que pode ser detetada pelo ouvido humano. Este tem origem numa fonte sonora, que causa movimento oscilatório no meio ambiente (emissão), é transmitido por variações de pressão através do meio (propagação) e detetado por um recetor, como por exemplo o ouvido humano ou um microfone (recepção) (IA, 2004).

As ondas sonoras são caracterizadas por três parâmetros físicos, a amplitude, o comprimento de onda e o período, que se encontram representados na Figura 1.

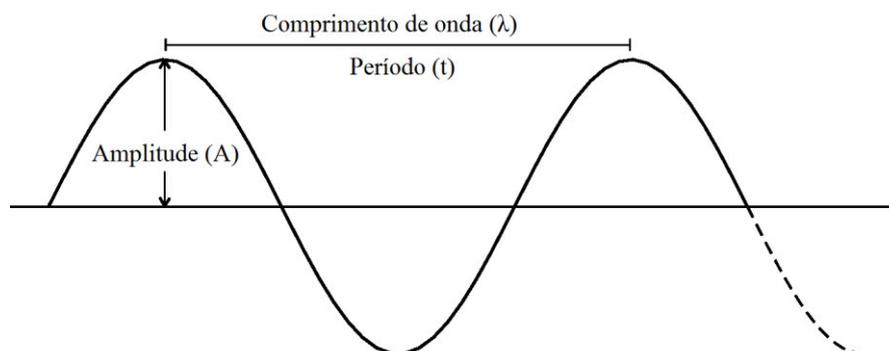


Figura 1 – Parâmetros físicos do som

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.

A velocidade a que o som se propaga é determinada pela densidade e pressão do meio, características estas que dependem da temperatura. A velocidade está também relacionada com o comprimento de onda e com a frequência, assim como se comprova na Equação 1 (Ostergaard, 2003).

$$c = f \times \lambda \tag{1}$$

Em que:

c é a velocidade do som (m/s)

f é a frequência (Hz ou ciclo)

λ é o comprimento de onda (m/ciclo)

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. Através da Equação 1 é possível perceber que este parâmetro é inversamente proporcional ao comprimento de onda, sendo que altas frequências correspondem a pequenos comprimentos de onda, e vice-versa.

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). O ouvido humano é sensível a uma gama de pressões sonoras muito alargada (amplitudes entre o limiar da audição e o limiar da dor), sendo por isso complicado obter uma escala linear (IA, 2004). Por essa razão estabeleceu-se uma relação logarítmica, obtendo uma variação audível pelo ser humano entre 0 e 120, expressas em decibel (dB) (Carvalho e Rocha, 2008). Na Figura 2 é apresentada uma escala dos níveis de pressão sonora, com a sua relação com o ser humano e respetivos exemplos do quotidiano.

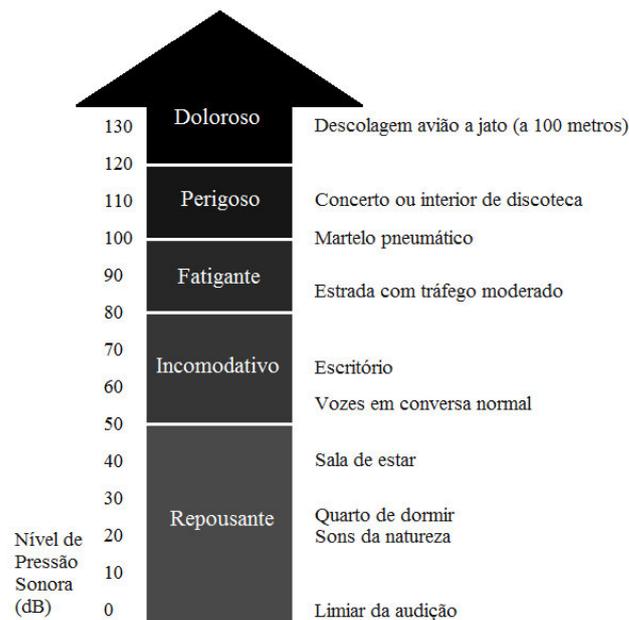


Figura 2 – Escala dos níveis de pressão sonora (adaptado de <http://www.m-almada.pt>)

O decibel é então definido como a unidade de medida do nível de pressão sonora, no entanto não representa a sensação auditiva humana de forma real devido à sua sensibilidade a frequências muito baixas (infra-sons) e muito altas (ultra-sons), por esta razão deve ser ponderado por um coeficiente que funciona como filtro nos equipamentos de medida. Desta forma foi estabelecido um curva de ponderação A, expresso em dB(A), que descreve a sensação com que o Ser Humano percebe determinado ruído (IA, 2004). No entanto, dependendo da banda de frequência em causa, o nível de pressão sonora é ponderado pelas curvas de ponderação A, B, C e D (Silva, 2012), apresentadas no gráfico da Figura 3.

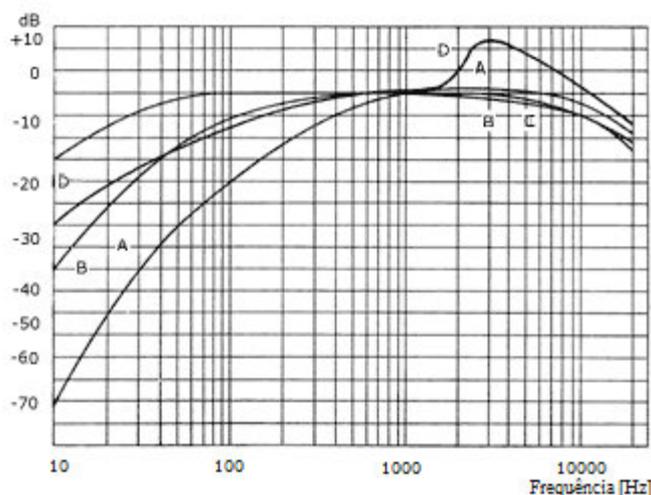


Figura 3 – Curvas de ponderação de frequências (<http://www.solerpalau.pt>)

O ruído é definido como um som indesejado ou desagradável para o ser humano, algo que não tem significado auditivo (Carvalho e Rocha, 2008). Contudo, isto é subjetivo pois depende não só do som, mas também das capacidades recetivas do ouvido de cada pessoa, dos momentos e circunstâncias em questão, e ainda do local onde se encontra o ouvinte (Silva, 2012).

Segundo a Organização Mundial de Saúde (WHO, 2011) um dos maiores contributos para o ruído ambiental é o ruído do tráfego rodoviário, como tal a acústica rodoviária tem sido, cada vez mais, alvo de estudos e de ações de intervenção. Quando se trata de acústica rodoviária e dos seus impactes na saúde pública, para além das medições físicas do nível de ruído através dos indicadores acústicos, é importante quantificar a sua relação com a reação humana através dos indicadores psicoacústicos.

2.2. Efeitos do ruído no ser humano

As pessoas vivem em ambientes repletos de sons com diferentes significados, podendo ser fontes de informação, usados como forma de comunicação, distração ou tranquilizante, ou mesmo ter efeitos negativos na saúde (IA, 2004). A reação e a tolerância dos indivíduos não é de fácil determinação, pois depende da sua idade, das experiências individuais, do seu estado de espírito, entre outros fatores (Carvalho e Rocha, 2008). Vários estudos revelam que o Ser Humano vai se habituando ou adaptando ao ruído, devido às alterações fisiológicas e psicológicas de cada indivíduo (IA, 2004). Contudo, pode ter efeitos de carácter diverso e intensidade variável, não deixando de ter consequências na saúde, que tanto podem ser a nível físico, fisiológico ou psicológico. A Figura 4 apresenta alguns exemplos de consequências provocadas pelo ruído, ordenados por gravidade e a sua relação com o número de pessoas afetadas.



Figura 4 – Gravidade dos efeitos do ruído na saúde e número de pessoas afetadas (WHO, 2011)

Os efeitos físicos ou auditivos revelam-se em alterações nas propriedades físicas do sistema auditivo através de perdas auditivas temporárias ou permanentes, que podem ser parciais ou totais. Os efeitos fisiológicos são observados em alterações na atividade do corpo humano, como em alterações do ritmo cardíaco e respiratório, da pressão sanguínea ou das tensões musculares. Por sua vez, os efeitos psicológicos manifestam-se em alterações do

comportamento como o stress, a fadiga, a diminuição da capacidade de concentração e a irritabilidade (IA, 2004).

Geralmente a exposição ao ruído ambiente não causa perdas auditivas, a não ser que se trate de exposição a níveis demasiado elevados e por longos períodos de tempo (CE, 1996). A duração da exposição diária a níveis sonoros elevados varia muito com a sua intensidade e composição. Por exemplo, uma exposição contínua e repetida a estímulos sonoros com um nível superior a 85 dB(A) pode levar a danos irreversíveis nas células ciliadas, perdendo assim a sensibilidade a certas frequências dos sons. Ruídos muito intensos, com um nível superior a 120 dB(A) ou com características impulsivas podem não só destruir as células ciliadas, mas também o tímpano ou o ouvido médio, consequências estas que podem ser irreversíveis (Carvalho e Rocha, 2008).

Relativamente aos efeitos não auditivos, os de carácter fisiológico estão muito associados a doenças cardiovasculares, devido à exposição a elevados níveis de ruído, como por exemplo do tráfego rodoviário, que alteram o ritmo cardíaco, levando a um aumento do risco de hipertensão, e possivelmente a uma isquemia cardíaca, ou até a um enfarte do miocárdio (WHO, 2011).

Os principais efeitos psicológicos estão associados a perturbações cognitivas em crianças, nomeadamente problemas de atenção, memória, raciocínio, percepção e criatividade, e consequentemente a redução da capacidade de aprendizagem; incomodidade; alterações de humor; e sensação de zumbido causado pela exposição ao ruído excessivo, que em alguns casos pode causar stress, ansiedade, distúrbios do sono, efeitos cognitivos, e até mesmo incapacidade de trabalho (WHO, 2011).

2.3. Indicadores de ruído

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 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.

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_{max} 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. 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 (DL, 2007).

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. A diferença não pode exceder 5 dB(A) no período diurno, 4 dB(A) no período do entardecer, e 3 dB(A) no período noturno.

2.4. Indicadores Psicoacústicos

As reações causadas pelo ruído no ser humano dependem não só das características do sinal, como o nível de pressão sonora, o espectro de frequência e a duração, mas também de condições físicas e psicológicas, e da atividade de cada indivíduo. Assim, uma eficaz descrição do desconforto causado pelo ruído só é possível mediante a consideração das características da audição humana e dos aspetos emocionais (Raggam et al., 2006).

Para melhor entender, prever e comparar os impactos dos diferentes níveis de incomodidade provocado pelo ruído dos pavimentos é importante avaliar não apenas os indicadores acústicos usuais. Então, quando se pretende comparar superfícies de pavimentos, são consideradas várias medições acústicas, entre as quais os indicadores de ruído ponderados pelo filtro A, L_{Aeq} e L_{Amax} , e os indicadores psicoacústicos (Freitas et al., 2012b).

Os indicadores psicoacústicos quantificam a relação entre a resposta e reação dos ouvintes perante o som, e as suas propriedades físicas (Orfield, 1992). Estes permitem não só determinar a estimativa subjetiva de desconforto induzida por ruído, mas também parâmetros fisiológicos como a frequência cardíaca (Raggam et al., 2006).

Admite-se que os indivíduos que participam em experiências com estímulos sonoros realizadas em laboratório são capazes de avaliar algumas das características do estímulo, permitindo a sua contabilização na apreciação global da qualidade sonora. Nestas situações é possível a utilização de propriedades, como por exemplo a sensação de intensidade auditiva (loudness), a rugosidade (roughness), e a agudeza (sharpness) dos estímulos sonoros.

2.4.1. Loudness

Loudness é um termo psicológico usado para descrever a magnitude de uma sensação auditiva. Presume-se que este depende do número total de impulsos nervosos que chegam ao cérebro por segundo, ao longo do aparelho auditivo (Fletcher e Munson, 1933).

O loudness depende principalmente da pressão sonora, da frequência e da forma da onda que compõe o estímulo. Na sua determinação é necessário definir não só as características do estímulo, como a sua intensidade e composição física, mas também o tipo de ouvido recetor, as

características auditivas, e condições fisiológicas e psicológicas do ouvinte (Fletcher e Munson, 1933). Filtros como a curva de ponderação A ajustam as medições acústicas de modo a corresponder a uma intensidade percebida pelo ouvido humano típico, no entanto, a percepção de loudness é um processo de ponderação bem mais complexo (Olson, 1972).

Num dos primeiros estudos, Fletcher e Munson (1933) optaram por medir o nível sonoro de um som comparando-o com um tom puro de 1.000 Hz, tom de referência. O loudness do som comparado foi ajustado até que, em média, fosse considerado ser tão alto como a referência.

A unidade do loudness é o sone, e é definido como a intensidade sentida por um ouvinte típico, quando confrontado com um tom de 1.000 Hz a um nível de pressão sonora de 40 dB acima do limiar de audição (Olson, 1972).

Ao nível de pressão sonora, expresso em dB, de um som com a frequência de 1000 Hz é chamado de nível de loudness do som, e é expresso em phons. Assim, o nível de loudness de qualquer som deve ser o nível de intensidade de um tom de referência igualmente alto, na posição onde estará a cabeça do ouvinte (Fletcher e Munson, 1933). O nível de loudness é dado pela Equação 2, e a relação entre loudness (em sones) e nível de loudness (em phons) é dada pela Equação 3 (Olson, 1972), e encontra-se representada na Figura 5.

$$P = 20 \log_{10} \frac{p}{p_0} \quad (2)$$

Em que:

p é o nível de loudness, em phons

P é a pressão sonora medida, em microbares

p_0 é a pressão sonora de 0.0002 microbares

$$S = 2^{(P-40)/10} \quad (3)$$

Em que:

S é o loudness, em sone

P é o nível de pressão sonora, em phons, dado pela Equação 2

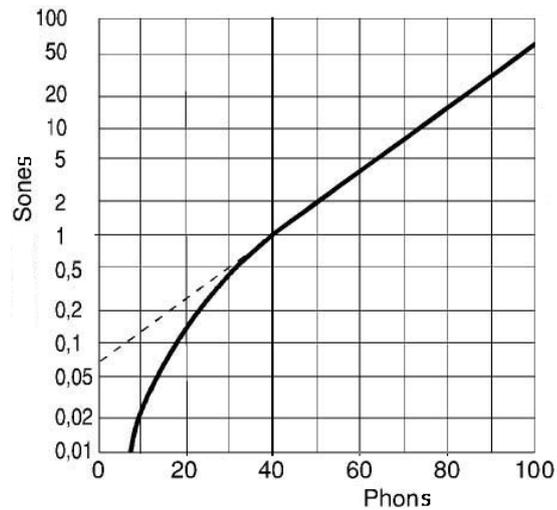


Figura 5 – Relação entre o loudness (sones) e o nível de loudness (phons)

Os nossos ouvidos não percebem todos os sons de forma igual às várias frequências e intensidades sonoras. A Figura 6 mostra o gráfico dos contornos de igual loudness. Um contorno de igual loudness é uma medida da pressão sonora (dB SPL) sobre o espectro de frequência, no qual um ouvinte percebe um loudness constante quando apresentado com tons puros estáveis. Por definição, diz-se que duas ondas sinusoidais de frequências diferentes têm o mesmo nível de loudness, em phons, se forem percebidos como igualmente ruidosos por um ouvinte comum, sem deficiência auditiva significativa.

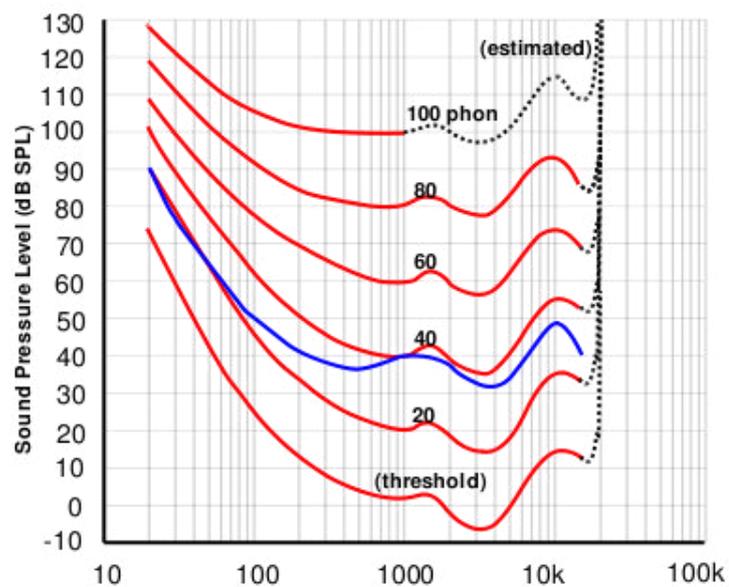


Figura 6 – Contornos de igual loudness (curvas a vermelho) e curva padrão ISO original (azul) para 40 phons (ISO 226:2003)

Do domínio rodoviário verifica-se que o loudness de um som é causado por efeitos recíprocos complexos de componentes de frequência e da sua evolução temporal, resultando no facto de que os sons com valores de L_{Aeq} equivalentes podem levar a uma estimativa de loudness diferente. Por exemplo, uma pessoa a gritar parece mais alto do que uma pessoa a falar, mesmo quando ambos os sons estão na mesma amplitude de onda (Mendonça, 2012).

Estudos constataram que loudness é a melhor medida acústica para prever deteção de veículos, quando comparado com L_{Aeq} e L_{Amax} (Mendonça et al., 2013), para além de ser um bom preditor da incomodidade do ruído dos pavimentos (Freitas et al., 2012b).

2.4.2. Roughness

Roughness é um indicador psicoacústico relacionado com dissonância sensorial. É a sensação de batimentos produzidos pela interação de dois ou mais componentes que são detetados dentro de uma determinada distância no ouvido interno. Esta distância é conhecida como largura de banda crítica, e varia com a frequência (Mendonça, 2012).

A unidade do roughness é o asper (palavra latina quem significa áspero), e equivale a um som de 1000 Hz com 100% de modulação em amplitude e com uma frequência de modulação de 70 Hz (Orfield, 1992).

Para sons estacionários o roughness é quantificado pela frequência e amplitude de modulação, em função da frequência do estímulo. A sensação de rugosidade de um estímulo sonoro resulta de modulações em amplitude e em frequências compreendidas entre os 15 Hz e 300 Hz, e é maior quando a frequência de modulação é próxima de 70 Hz. Por essa razão, para esta frequência de modulação é definido o valor unitário $R=1$ asper para um som de 1000 Hz, com nível sonoro de 60 dB, com uma frequência de modulação aproximadamente igual a 70 Hz (Antunes, 2011).

O roughness, quando combinado com o loudness, descreve a correlação com estimativa subjetiva de sons que induzem desconforto, melhor que um nível sonoro com ponderação A (Raggam et al., 2006).

2.4.3. Sharpness

Sharpness é uma sensação auditiva relacionada com a frequência, e é uma medida psicoacústica usada algumas vezes para avaliar a qualidade do som (Mendonça, 2012).

Os parâmetros que mais influenciam o sharpness são o conteúdo espectral, a frequência central de sons de banda estreita e correspondente largura de banda. A sensação de agudeza deste indicador psicoacústico é produzida pelas componentes de alta frequência dos sinais acústicos, podendo-se considerar como um indicador do equilíbrio entre as frequências mais elevadas e as mais baixas, ou seja, componentes de maior frequência no sinal geralmente resultam em medidas de sharpness superiores (Antunes, 2011).

A sua unidade de medida é o acum (palavra com origem do latim acumem, que tem como significado agudo), que corresponde ao estímulo produzido por um ruído de banda estreita, com a largura de banda igual à banda crítica centrada na frequência de 1000 Hz, e com um nível de 60 dB (Orfield, 1992).

A largura de banda crítica corresponde à largura de banda de frequência do filtro auditivo criada pela cóclea, órgão que contém os terminais nervosos responsáveis pela audição.

2.5. Geração do ruído rodoviário

Os transportes rodoviários são uma fonte de ruído ambiental dominante, a qual resulta da contribuição das emissões de todos os veículos que circulam em determinada via de tráfego (Freitas et al., 2008a). Contudo, deve-se analisar os veículos não só como um todo, mas também por componente que emite ruído, tendo este três principais origens: o motor e o sistema de exaustão, a configuração aerodinâmica do veículo e a interação pneu-pavimento (Sandberg e Ejsmont, 2002).

Considerando todas as fontes sonoras de um veículo, verifica-se que para baixas velocidades predomina a componente do ruído do motor, e numa gama de velocidades acima dos 50 km/h, a fonte preponderante corresponde à interação pneu-pavimento. Por isso, os pneus são um dos principais componentes do veículo, no que diz respeito à emissão de sons, tendo maior relevância em zonas fora de localidades (Sandberg e Ejsmont, 2002).

O motor e o sistema de exaustão contribuem para o ruído devido à vibração dos seus componentes. O ruído aerodinâmico depende da forma da carroçaria do veículo, pois surge da sua interação com o ar, e aumenta com a velocidade de circulação. Por sua vez, os mecanismos associados à interação pneu-pavimento podem ter origem mecânica ou aerodinâmica.

Os mecanismos de geração mecânica são devidos às vibrações radiais e tangenciais que resultam do impacto do pneu, da sua aderência à superfície do pavimento e deformação causada pela rugosidade da estrada, devido às vibrações da parede lateral, e às vibrações do tipo stick-slip e stick-snap, que resultam do fenómeno de aderência-deslize e aderência-descolamento, respetivamente (Figura 7).

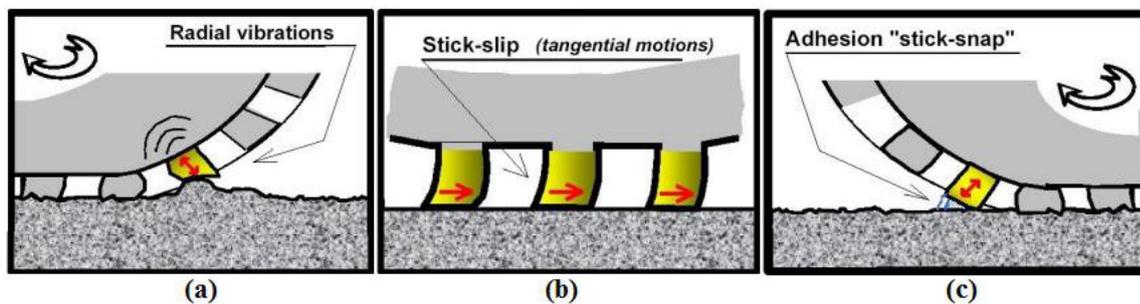


Figura 7 – Exemplos de mecanismos de geração mecânica da interação pneu-pavimento: Vibração radial causada pela interação bloco do piso-pavimento (a); Movimento aderência-deslize dos blocos no pavimento (b); Aderência entre os blocos e o pavimento na saída da zona de contacto (c) (Sandberg e Ejsmont, 2002)

Os mecanismos de geração aerodinâmica são devidos ao efeito de bombeamento de ar que ocorre no momento em que o pneu interage com a superfície, e são traduzidos pela compressão e expansão do ar, a ressonância da cavidade no tubo do pneu, a radiação da ressonância de ar, e a ressonância tubular (Sandberg e Ejsmont, 2002) (Figura 8).

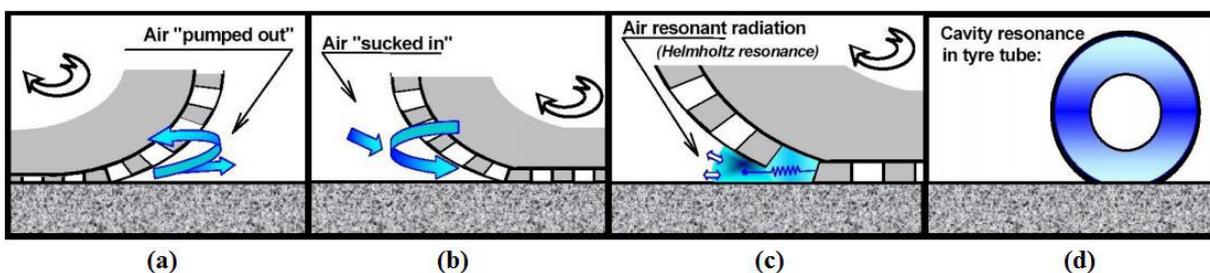


Figura 8 – Exemplos de mecanismos de geração aerodinâmica da interação pneu-pavimento: Bombeamento do ar a sair e a entrar da zona de contacto (a e b); Amplificação sonora causada pelo órgão de tubos e a geometria de ressonador de Helmholtz dentro da trajetória de contacto (c); Ressonância acústica no espaço de ar no interior do pneu (d) (Sandberg e Ejsmont, 2002)

Estes mecanismos são amplificados devido ao efeito de pavilhão, podendo ser amplificados ou atenuados em função da impedância acústica e mecânica da superfície, e da frequência de ressonância do sistema roda/pneu (Figura 8 (d)). São influenciados por fatores como o comportamento dos condutores, as características dos pneus e da superfície do pavimento, e o clima do local (Freitas, 2008).

O conhecimento dos mecanismos de geração de ruído, em particular da interação pneu-pavimento, é essencial para apoiar a formulação de misturas betuminosas para camadas de desgaste com propriedades acústicas adequadas.

2.6. Propagação do ruído rodoviário

De modo a obter uma caracterização completa da poluição sonora das infraestruturas rodoviárias e do desempenho acústico das superfícies dos pavimentos, deve ter-se em atenção não só o estudo da geração, mas também da propagação do ruído rodoviário (Licitra et al., 2009).

O ruído é emitido por uma ou várias fontes sonoras e propaga-se sobre a forma de ondas mecânicas concêntricas, podendo ter uma forma esférica, cilíndrica ou planar, em função do tipo de fonte. As ondas esféricas proveem de uma fonte do tipo pontual, como por exemplo um martelo pneumático ou um veículo automóvel; as ondas planas são provenientes de uma fonte tipo planar, ou seja, um ruído emitido por uma superfície, como é o caso das paredes de uma nave industrial; e as ondas cilíndricas, por sua vez, são provenientes de uma fonte tipo linear, como é o caso do ruído de uma via de tráfego rodoviário (Silva, 2012). O ruído do tráfego rodoviário pode ser então considerado um conjunto de inúmeras fontes pontuais (veículos) distribuídas ao longo de um espaço linear (estrada).

O ruído diminui com o aumento da distância do recetor à fonte sonora e propaga-se até atingir um obstáculo. Quando isto acontece parte do ruído é refletido e a restante absorvida sob a forma de calor, podendo parte desta ser transmitida através do obstáculo. Pode ainda ocorrer o fenómeno de difração, em que o ruído chega ao recetor de forma indireta passando pelos bordos superiores e laterais do obstáculo (IA, 2004).

Como o ruído do tráfego se propaga ao longo de um espaço linear, à medida que a distância à fonte aumenta, o nível sonoro diminui, mas não tanto como se de uma fonte pontual se tratasse, devido à contribuição das fontes de ruído mais distantes da linha. A uma distância duplicada em relação à fonte, para uma fonte pontual o fator de ponderação é de 6 dB(A), enquanto que para uma fonte linear é de 3 dB(A) (Hanson et al., 2005). A relação entre o nível sonoro a diferentes distâncias de uma fonte linear pode ser determinada a partir da Equação 4 (Harris, 1979).

$$L_A = L_{ref} - 10 \log\left(\frac{r}{r_{ref}}\right) \quad (4)$$

Em que:

L_A é o nível sonoro de uma distância r (dB);

L_{ref} é o nível sonoro de referência (dB);

r é a distância entre a fonte de ruído e o recetor (m);

r_{ref} é a distância de referência (m).

Para além da presença de obstáculos (como edifícios, muros, árvores, etc.), são vários os fatores que contribuem para a dissipação da energia sonora. A absorção atmosférica causada pela absorção molecular, as condições meteorológicas (como por exemplo o vento, a humidade relativa do ar, e as variações de temperatura) e as características do meio envolvente, como a morfologia e a altimetria do terreno, são as principais causas da dissipação sonora (Silva, 2012). Um ruído propaga-se melhor num solo refletor, como é o caso de um pavimento rodoviário, do que num solo vegetal, pois este tem uma maior absorção sonora (IA, 2004). Relativamente às condições atmosféricas, a velocidade do ruído aumenta com o aumento da temperatura ambiente e com a direção do vento, diminuindo quando o vento se encontra na direção contrária, devido não só à sua velocidade, mas também à deformação que este provoca nas ondas sonoras esféricas (Silva, 2012).

2.7. Métodos de avaliação do ruído

A avaliação do ruído de tráfego pode ser feita sob duas vertentes, a ambiental e a do pneu-pavimento. Na vertente ambiental o Decreto-Lei n.º 9/2007 de 17 de Janeiro da República Portuguesa estabelece e articula o novo Regulamento Geral do Ruído com outras normas e/ou regimes jurídicos portugueses.

Na vertente pneu-pavimento existem vários métodos que têm vindo a ser utilizados para a comparação do desempenho acústico de superfícies de estradas. Os métodos mais utilizados, e com maior destaque, são 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), e o método da passagem controlada (Controlled Pass-By method, CPB).

Os métodos SPB e CPB são considerados indicados para caracterizar o ruído em estudos dos pavimentos. Todavia, dada à sua simplicidade e versatilidade em termos de condições de aplicação, o método utilizado neste estudo, o CPX, é também cada vez mais utilizado na avaliação do ruído de superfícies de pavimento (Antunes et al., 2008).

2.7.1. Método estatístico de passagem (SPB)

O ensaio SPB é executado em conformidade com a Norma ISO 11819-1:1997: “*Acoustics – Measurement of the influence of road surfaces on traffic noise – Part 1: Statistical Pass-By method*”. Este baseia-se na medição dos níveis máximos de pressão sonora ponderada A de um número estatisticamente significativo de veículos em passagem, que compõem a gama de tráfego em condições normais de circulação, num trecho específico da estrada para as velocidades de circulação dos veículos. Para a medição, o microfone deverá estar colocado a 7,5 m do centro da via de tráfego e entre 1,1 m e 1,3 m acima do plano da faixa de rodagem (Figura 9). Assim, a cada passagem individual de um veículo são registados os seus níveis sonoros e a velocidade.

As várias medições dos níveis de ruído dos veículos permitem caracterizar o pavimento rodoviário através do Índice Estatístico de Passagem, (Statistical Pass-By Index – SPBI). Este índice é um valor global de como a superfície do pavimento influencia o ruído rodoviário, para uma combinação de diferentes categorias de veículos, pesos e velocidades de circulação, podendo ser usado na comparação de diferentes camadas superficiais de pavimentos rodoviários, para que se possa determinar a sua influência no nível de ruído de um fluxo de tráfego misto.



Figura 9 – Configuração da metodologia de aquisição de ruído pelo método SPB (Freitas et al., 2008c)

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), e a necessidade de área de ensaio sem presença de superfícies refletoras próximas do microfone (Freitas et al., 2008a). A variabilidade da composição do tráfego é também uma dificuldade à aplicação integral deste método, pelo que muitas vezes se compara diretamente os níveis de ruído a diferentes níveis de velocidade obtidos em pavimentos diferentes e considerando uma única categoria de veículos (Inácio et al., 2012).

2.7.2. Método de passagem controlada (CPB)

O método da passagem controlada (CPB) é semelhante ao método SPB. A configuração da medição do ruído é semelhante, a diferença está nos veículos usados no ensaio. Os veículos usados neste método são selecionados, em vez de circularem correntemente na estrada, e são ainda controladas condições como a velocidade, o tipo de pneu, a mudança engrenada no veículo e o número de passagens.

Este método tem como principal vantagem um maior controlo do ensaio relativamente às velocidades praticadas, acelerações ou desacelerações indesejadas, e estado dos pneus (Inácio et al., 2012). Tem assim um grande interesse na comparação de diferentes pavimentos às mesmas condições de circulação, não dependendo do tráfego que circula naquele trecho (Antunes et al., 2008).

Os ensaios efetuados por este método, e pelo SPB, são considerados os mais adequados para a quantificação do ruído total na berma da estrada ou nas suas imediações, uma vez que regista todos os tipos de fontes de ruído rodoviário, contabilizando também os efeitos de absorção no solo entre a fonte sonora e o recetor (Freitas et al., 2008b).

2.7.3. Método da proximidade imediata (CPX)

Atualmente são vários os métodos que possibilitam avaliar o ruído de interação pneu-pavimento, sendo o mais vantajoso do ponto de vista da gestão da qualidade da rede rodoviária o método da proximidade imediata (CPX). Este método é realizado de modo contínuo e à velocidade de circulação do tráfego, possibilitando a medição de um nível equivalente de ruído numa base espacial e não temporal, como é comum fazer-se na avaliação da qualidade funcional dos pavimentos a nível da rede (Freitas et al., 2012a).

O método CPX consiste na medição do ruído junto a uma roda do veículo, em campo próximo, podendo ser realizada de duas formas: utilizando um atrelado normalizado (puxado por um veículo comum) onde são colocados pneus de ensaio e pelo menos dois microfones junto do pneu, ou os microfones são colocados junto a uma roda do próprio veículo. Deste modo apenas são gravados os ruídos provenientes das fontes sonoras associadas à interação pneu-pavimento. A Figura 10 apresenta dois exemplos de montagem dos microfones do sistema de aquisição deste método, um aplicado no pneu de um veículo, e outro utilizando um atrelado normalizado.



Figura 10 – Sistemas de aquisição da metodologia CPX (Loon, 2008)
(<http://www.highfrictionroads.com>)

com as superfícies refletoras (existentes frequentemente em espaços urbanos) e com a passagem de outros veículos (Antunes et al., 2008). Tem também o benefício de não causar transtorno no tráfego da estrada em estudo. No entanto é menos realista relativamente à posição do recetor, uma vez que se trata de uma medição em campo próximo, e este normalmente encontra-se em campo afastado (McDade et al., 2012). Além disso não possibilita a avaliação de todos os parâmetros ligados ao ruído, como os efeitos da propagação e da absorção sonora (Antunes et al., 2008).

3. FATORES QUE INFLUENCIAM O RUÍDO DO TRÁFEGO

Os fatores que influenciam o ruído do tráfego rodoviário podem ser divididos em quatro principais grupos, sendo estes os veículos, os pavimentos, as condições climáticas e o comportamento dos condutores.

Nos veículos, as variáveis da emissão de ruído são o tipo de veículo, o tipo de pneu, e a velocidade de circulação. No caso dos pavimentos, os principais fatores de influência são o tipo de pavimento e as respetivas propriedades físicas, a sua superfície e a idade (estado de conservação). A conjugação de todos estes fatores dá então origem ao ruído rodoviário, que por sua vez gera impactes sobre os níveis de ruído geral.

3.1. Veículos

Nos últimos anos os veículos têm sido alvo de preocupações, estudos e desenvolvimentos devido aos níveis de ruído que estes produzem nos ambientes urbanos. Isso é perceptível na redução do ruído que os ambientes rodoviários sofreram nas duas últimas décadas.

Recentemente a Comissão Europeia aprovou uma proposta de regulamento sobre novos limites de emissão de ruído para os novos veículos a ser vendidos na União Europeia, com o objetivo de salvaguardar os cidadãos das repercussões negativas causadas pela exposição prolongada ao ruído. Isto irá permitir reduzir, nos próximos quatro ou cinco anos, o ruído dos veículos ligeiros em 4 dB e dos pesados em 3 dB (Nadkarni e Chatain, 2013).

A contribuição dos veículos para o ruído tem como origem o seu próprio funcionamento, a interação pneu-pavimento e a sua aerodinâmica. O ruído proveniente destas fontes está diretamente ligado com a velocidade de circulação do veículo, no entanto existem outros fatores influentes como o tipo de veículo e o tipo de pneu.

3.1.1. Tipo de veículo

Os recentes desenvolvimentos em torno da redução das emissões por parte da indústria automóvel tem importância no ruído total do veículo, pois quando este se encontra a velocidades baixas e em aceleração o ruído do motor é predominante, tornando o ruído da

interação pneu-pavimento menos relevante. No entanto, para velocidades acima dos 40 km/h, em veículos ligeiros o ruído pneu-pavimento é a maior fonte de ruído, tornando a contribuição do motor insignificante (Bendtsen e Andersen, 2005).

Segundo Sandberg (2001), em veículos ligeiros o ruído pneu-pavimento predomina sobre o motor para todas as velocidades, exceto quando o veículo tem a primeira mudança engrenada. Em veículos pesados o ruído do motor predomina em qualquer aceleração até 50 km/h, e a partir desta velocidade o ruído de interação pneu-pavimento torna-se o preponderante. A Figura 12 mostra variação do ruído do motor e da interação pneu-pavimento em veículos ligeiros e pesados em função da velocidade, sendo possível verificar para cada velocidade qual a fonte de ruído predominante.

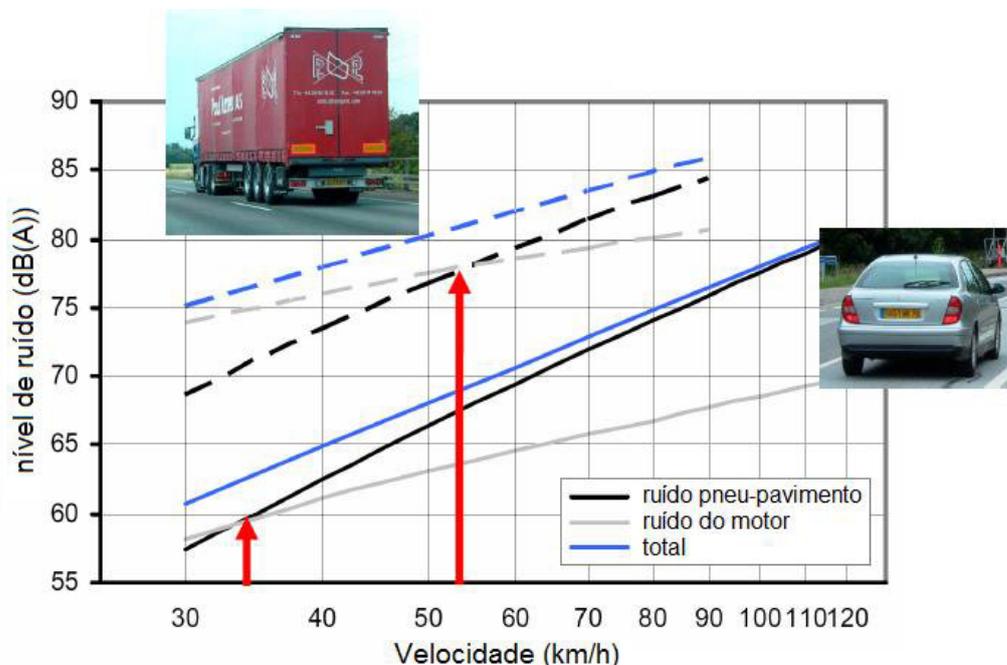


Figura 12 – Representação dos níveis de ruído do motor, da interação pneu-pavimento, e total para veículos ligeiros e pesados em função da velocidade (Bendtsen, 2008)

Atualmente o tráfego é composto pelos mais variados tipos de veículos ligeiros, diferentes tipos de pesados, e motocicletas, em velocidade cruzeiro ou em aceleração. Isto permite obter num mesmo ambiente rodoviário inúmeras fontes com níveis de ruído muito variáveis. De um modo geral, o nível de ruído de cada veículo a diferentes níveis de velocidade não tem uma variação muito significativa, no entanto o nível de ruído de um veículo pesado pode chegar a ser superior ao ruído de um veículo ligeiro em 15 dB(A) (Freitas, 2008).

3.1.2. Tipo de pneu

Devido à contribuição dos pneus para os níveis de ruído gerados por um veículo, as indústrias tentam cada vez mais otimizar as suas características desenvolvendo novos modelos. Para que ocorra uma redução do ruído produzido pelo tráfego rodoviário é importante estabelecer disposições que sensibilizem e incentivem os utilizadores finais a adquirir pneus que produzam um menor ruído exterior de rolamento, prestando informações harmonizadas acerca deste parâmetro.

O Regulamento nº 117 da Comissão Económica das Nações Unidas para a Europa (UNECE) de 25 de Novembro de 2009 exige que todos os pneus à venda na UE contendam um rótulo com informações sobre os parâmetros dos pneus (Figura 13), influenciando as decisões de compra dos utilizadores finais no sentido de pneus mais seguros, silenciosos e eficientes em termos energéticos. Estes rótulos classificam o consumo de combustível, a aderência em superfície molhada e o ruído emitido pelo pneu no exterior do veículo, promovendo para além da segurança e da economia, a redução do impacto do ruído no meio ambiente, melhorando cada vez mais o seu desempenho (CE, 2009).

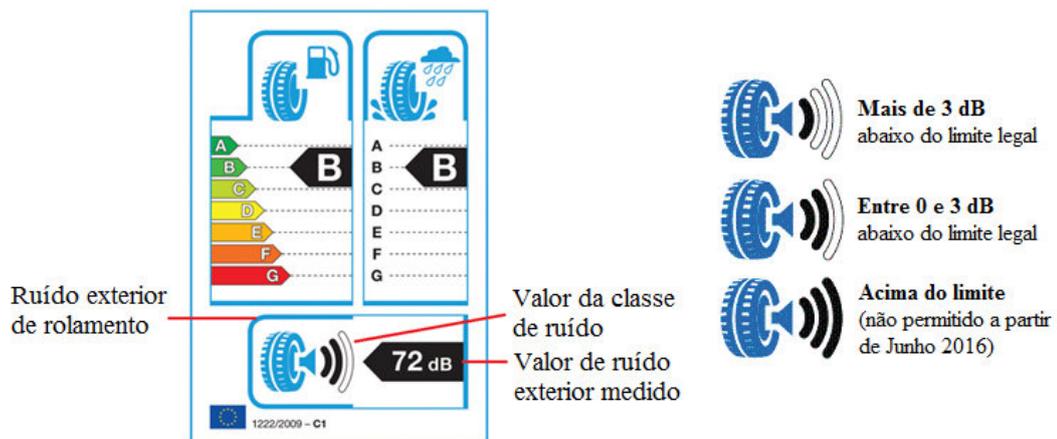


Figura 13 – Formato do rótulo e classes de ruído exterior de rolamento (CE, 2009)

As características que determinam o ruído de contacto pneu-pavimento são a carga, a pressão de ar do pneu 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., 2008c). O ruído gerado depende ainda de outras características como a idade, a estrutura, a rigidez da borracha, o relevo e o desgaste (Freitas et al., 2006).

A carga e a pressão de ar do pneu são fatores com pouca influência no ruído. O efeito da carga pode levar a aumentos no ruído inferiores a 2 dB(A) em pavimentos como o drenante ou a superfície de referência ISO, e o seu aumento, associado a pressões reduzidas, conduzem a aumentos de ruído em cerca de 1 dB(A) (Pucher et al., 2006).

Relativamente às dimensões do pneu, um aumento da sua largura traduz-se num aumento do nível de ruído, e um aumento do diâmetro implica a alteração de outras características, logo é difícil analisar o seu efeito (Pucher et al., 2006). Vários estudos (Sandberg e Ejsmont, 2002) mostram que o aumento de 10 mm da largura do pneu, em veículos ligeiros, leva a um aumento do nível de ruído de 0,2 a 0,8 dB(A).

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 e Ejsmont, 2002). A introdução de ranhuras oblíquas, ranhuras circunferenciais e lamelas reduzem as vibrações tangenciais dos blocos da escultura do pneu, o efeito de sucção, e a expulsão de ar nas ranhuras, podendo levar a reduções no ruído gerado. Apesar da introdução de ranhuras transversais num pneu liso poder aumentar o ruído em 15 dB(A), as ranhuras circunferenciais diminuem o ruído em cerca de 6 dB(A), pois permitem uma maior ventilação das bolsas de ar (Sandberg e Ejsmont, 2002). 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 e Ejsmont, 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).

A norma ISO 11819-2:2000, do método de aquisição de ruído CPX, inclui especificações para um conjunto de quatro pneus de teste de referência padrão, três representantes de pneus de veículos ligeiros (pneus ISO A, B e C), e um representante de pneus para veículos pesados (pneu ISO D). Foi então elaborado um estudo a vários pneus candidatos a substitutos do pneu ISO A e do ISO

D (Blokland et al., 2006), onde numa primeira fase do estudo foram selecionados quatro para cada classe de pneu (Figura 14 e Figura 15), sendo que os pneus Tyre A9 e Tyre D9 são os respetivos pneus ISO.



Figura 14 – Pneus candidatos a substituir o pneu ISO A (Morgan et al., 2009)



Figura 15 – Pneus candidatos a substituir o pneu ISO D (Morgan et al., 2009)

Numa segunda fase (Schwanen et al., 2007, 2008) foi estudada a relação entre os níveis de CPX obtidos para os quatro pneus das duas classes, e os níveis de CPB para veículos ligeiros e pesados apropriados. As medições foram feitas em vários pavimentos, a uma gama de velocidades.

Os critérios de classificação dos pneus adotados foram, a compatibilidade com pneus antigos, a representatividade geral do SPB, a representatividade espectral, a aplicabilidade global, a praticabilidade, a reprodutividade no lote, e a disponibilidade a longo prazo dos pneus de substituição ou potencial para garanti-lo, uma vez que a indisponibilidade do pneu de referência levou à necessidade de obter pneus de teste alternativos. Todos os pneus obtiveram uma boa prestação, todavia o escolhido como melhor substituto do pneu A normalizado foi o Pneu A6, o Uniroyal Tigerpaw 225/60 R16, e a escolha como substituto do pneu D foi o Pneu D4, o Avon Supervan AV4 195-R14C.

3.1.3. Velocidade

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). Logo, com o aumento da velocidade aumentam os níveis de ruído, assim como os componentes globais da frequência, apresentando uma tendência para frequências mais altas.

A Figura 16 mostra de forma clara o aumento dos valores de L_{max} obtidos pelo método CPX 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). A correlação dos dados permitiu definir uma reta de ajustamento definida por uma equação linear (Equação 5).

$$y = ax + b \quad (5)$$

Onde:

y corresponde às coordenadas da reta no eixo das ordenadas

x corresponde às coordenadas da reta no eixo das abcissas

a é o coeficiente angular

b é o coeficiente linear

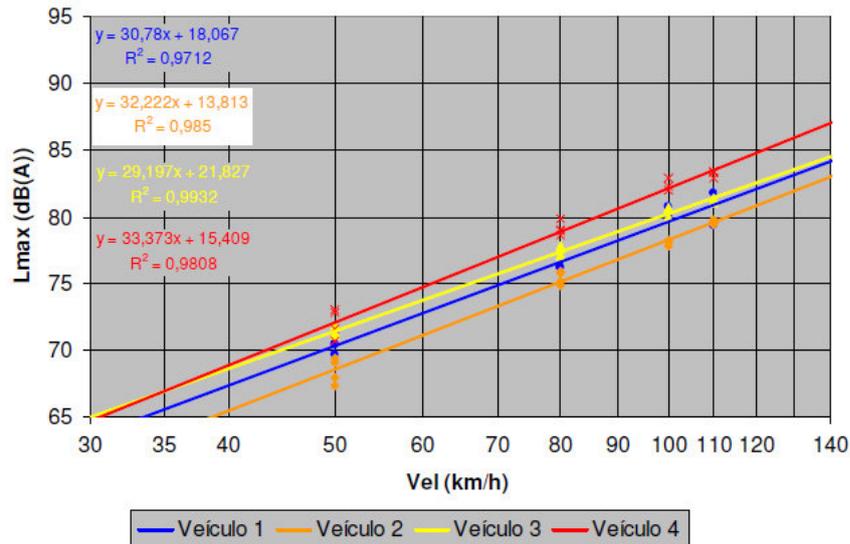


Figura 16 – Variação dos valores de L_{max} , para quatro veículos diferentes, com o aumento da velocidade (Antunes et al., 2008)

O nível de ruído, para uma mesma velocidade, varia devido a outros fatores como o tipo de veículo e o tipo de pavimento.

3.2. Pavimentos

O pavimento é uma estrutura constituída por várias camadas e construída sobre uma fundação que suporta as cargas provenientes do tráfego rodoviário, proporcionando uma circulação cómoda, segura e económica. O tipo de pavimento a adotar depende essencialmente da categoria da estrada, do tráfego previsto, das condições do terreno de fundação e das condições climáticas da zona (Almeida, 1986), sendo caracterizado pela sua constituição e comportamento mecânico. Entre os pavimentos compostos por várias camadas e materiais, pode fazer-se uma distinção entre os flexíveis e os rígidos, existindo no entanto uma terceira categoria, os pavimentos semi-rígidos.

Os pavimentos rígidos caracterizam-se por uma camada de desgaste com betão de elevada resistência, e têm como vantagem maior durabilidade e atrito superficial, quando comparados com pavimentos com camada de betão betuminoso. A sua superfície composta por ranhuras transversais proporciona um maior atrito, no entanto faz deste um pavimento mais ruidoso (Pereira e Picado-Santos, 2002). Uma textura superficial obtida por ranhuras transversais uniformes, especialmente com um espaçamento superior a 26 mm, gera os maiores níveis de

ruído pneu-pavimento, bem como os tons mais irritantes. Porém, pesquisas mostram que o espaçamento aleatório pode reduzir, e mesmo eliminar, o irritante tom puro gerado pelas ranhuras transversais, e a presença de ranhuras longitudinais reduzem os níveis de ruído geral (Wayson, 1998).

Os pavimentos flexíveis são constituídos por camadas de misturas betuminosas e camadas granulares, e a sua resistência estrutural é dada pelas diferentes camadas e materiais que o constituem. Dentro desta tipologia podem-se destacar os pavimentos de baixo ruído. As camadas de desgaste de um pavimento flexível podem ser realizadas em betão betuminoso, em betão betuminoso drenante, em micro-betão rugoso, em argamassa betuminosa e em betão betuminoso com borracha, sendo a camada de desgaste com características mais silenciosas a drenante, devido à sua elevada porosidade.

Para além dos pavimentos obtidos através da combinação de diversos materiais e dispostos por várias camadas, existem ainda pavimentos em calçada. Estes pavimentos são mais utilizados em zonas rurais e zonas urbanas, principalmente em centros históricos, pequenas vias, e zonas de velocidade de circulação reduzidas. Alguns exemplos usados neste tipo de revestimento são os cubos de granito, os blocos de cimento, cubos de calcário (Figura 17), lajes de granito e ainda material rochoso irregular. Para além de induzir à prática de velocidades mais reduzidas, estas superfícies são mais ruidosas.



Figura 17 – Exemplos de pavimentos em cubos de granito (a), blocos de cimento (b) e cubos de calcário (c) (<http://www.alvestone.com>)

Num estudo (Mendonça et al., 2013) em que se testaram três tipos de superfícies de pavimentos (mistura betuminosa densa, mistura betuminosa aberta com betume modificado com borracha, e pavimento em cubos de granito), verificou-se que o pavimento em cubos de granito é significativamente mais ruidoso do que os outros tipos de pavimentos. Quanto aos restantes pavimentos, a mistura betuminosa densa mostrou ser mais ruidosa que mistura betuminosa aberta com borracha, apesar de não significativamente. Um veículo que circula num pavimento em betão betuminoso denso ou em mistura betuminosa aberta com betume modificado com borracha a 70 km/h não provoca tanto ruído como um veículo que circula a 30 km/h num pavimento em cubos de granito (Mendonça et al., 2013).

Apesar de ruidosos, os pavimentos em calçada são uma boa opção para centros urbanos com grande afluência de peões, pois além de promover velocidades baixas, os níveis de ruído por estes gerados permitem garantir uma boa deteção dos veículos, logo maior segurança. Como já foi demonstrado em diversos estudos, o tipo de pavimento tem uma grande influência nos níveis de ruído produzidos pela interação pneu-pavimento, superior até à do veículo que circula no mesmo, por essa razão é relevante analisar o local e ambiente rodoviário para perceber qual o pavimento que melhor se adequa às necessidades acústicas.

A influência que o pavimento tem nos níveis de ruído gerados pela interação pneu-pavimento deve-se essencialmente às suas características superficiais. A Figura 18 apresenta uma visão geral da influência de várias características superficiais de estradas sobre o ruído pneu-pavimento (Sandberg e Ejsmont, 2002). Pode-se verificar que é possível obter uma diferença de 17 dB(A) no ruído de campo próximo, com a alteração do tipo de superfície. A ampla gama de níveis de ruído é, naturalmente, gerada por alguns tipos de superfície de estrada concebidos para produzir altos níveis de ruído, como um meio de controlo de velocidade, tais como os pavimentos em cubos de granito ou em blocos de cimento.

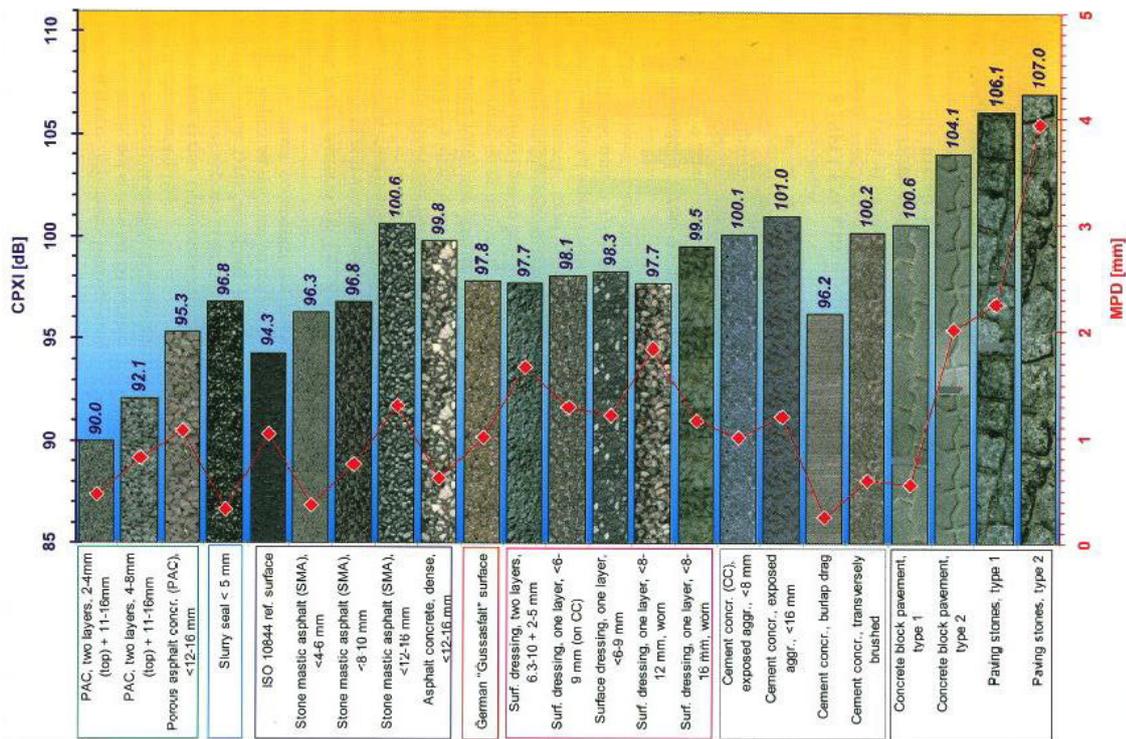


Figura 18 – Níveis sonoros, com ponderação A, de vários tipos de pavimento (Sandberg e Ejsmont, 2002)

As principais características das superfícies dos pavimentos são, a textura, a cor, a irregularidade, a porosidade, a rigidez e a idade (Freitas et al., 2006), sendo as características de maior influência acústica a textura, a porosidade, a absorção sonora e a impedância mecânica (Freitas et al., 2008a).

A textura é determinada pela combinação granulométrica, a qual determina o volume de vazios e as vibrações dos blocos do pneu (Freitas et al., 2008b). No estudo do ruído é importante descrever a textura de forma detalhada, em função dos comprimentos de onda e das amplitudes que caracteriza o perfil da superfície.

A textura é composta por três componentes, a microtextura, a macrotextura e a megatextura. A microtextura compreende comprimentos de onda de 1 µm a 0,5 mm, e amplitudes entre 0,001 mm e 0,5 mm, influenciando diretamente o atrito. A macrotextura, com comprimentos de onda entre 0,5 mm e 50 mm e amplitudes entre 0,1 mm e 20 mm, depende essencialmente da forma e proximidade dos agregados, e influencia a drenagem da superfície do pavimento e a geração do ruído pneu-pavimento. Por sua vez, a megatextura tem comprimentos de onda entre 50 mm e 500 mm e amplitudes entre 0,1 mm e 50 mm, condicionando a comodidade, a

estabilidade da condução, as cargas dinâmicas, o desgaste dos veículos e o ruído pneu-pavimento (Freitas, 2008). Uma profundidade de textura dos pavimentos nas gamas da macrotextura e megatextura influencia a emissão de ruído a baixas frequências (< 1000 Hz) e gera ruído devido às vibrações do pneu. Por sua vez, a gama da macrotextura tem influência na emissão de ruído nas altas frequências (> 1000 Hz), promovendo o bombeamento de ar nos sulcos da escultura do piso do pneu (Andrea et al., 1999). A Figura 19 ilustra a relação da textura da superfície do pavimento com o comprimento de onda e a frequência do ruído pneu-pavimento.

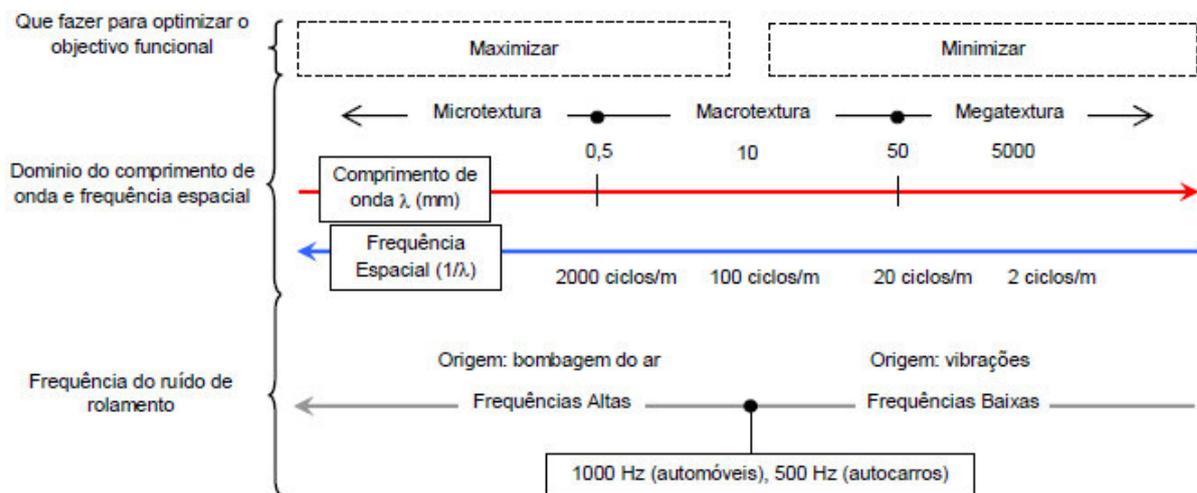


Figura 19 – Definição do tipo de textura em função do comprimento de onda e da frequência espacial [adaptado de (Domenichi et al., 1999)]

A porosidade do pavimento permite a drenagem da água e do ar que preenchem as ranhuras do pneu, proporcionando uma melhor absorção sonora, que se traduz na atenuação da propagação das ondas na superfície do pavimento e na redução da sua reflexão acústica, tendo em conta que isto só é relevante em superfícies com porosidade elevada (Freitas et al., 2008a). A porosidade reduz ainda o efeito de pavilhão que ocorre entre a superfície do pavimento e a parte do piso do pneu que não está em contacto com o mesmo. Para que estes efeitos sejam eficazes, a porosidade deve ser superior a 20% (Freitas, 2008).

A necessidade de conservação e reabilitação dos pavimentos tem levado à utilização de camadas superficiais delgadas com agregados de dimensão máxima reduzida, camadas estas que proporcionam atrito e drenagem de águas superficiais apropriados, reduzindo também o ruído de contacto pneu-pavimento. Estas camadas já são utilizadas há vários anos em alguns

países da europa como medida de redução do ruído, sendo que se verificaram diferenças de cerca de 5 dB em comparação com misturas convencionais (Freitas et al., 2009).

3.3. Condições climatéricas

As condições climatéricas são fatores relevantes na geração e na propagação do ruído rodoviário. Logo, a seleção do tipo de camadas superficiais a usar em pavimentos novos ou reabilitados deve depender de cada região.

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).

Relativamente à geração do ruído, a influência que a temperatura tem na fonte depende do tipo de superfície e das características dos pneus, pois tem efeito no ruído pneu-pavimento, assim como a água da chuva. 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). Geralmente, velocidades do vento mais reduzidas ou o aumento da temperatura conduzem a uma redução do nível de ruído (Santos et al., 2006).

A presença de água nos pavimentos pode aumentar significativamente os níveis de ruído, particularmente em função do tipo de superfície, do tipo de veículo e da quantidade de água, podendo esse aumento chegar a 15 dB(A) (Santos et al., 2006). Apesar dos mecanismos de geração de ruído em condições secas e molhadas serem basicamente os mesmos (Sandberg e Ejsmont, 2002), este aumento pode ser provocado por mecanismos como, o contacto entre a água projetada e o corpo do veículo, o deslocamento de água na frente da área de contacto (projeção de água), o impacto do relevo dos pneus na superfície da água, a compressão de água nas ranhuras dos pneus e consequente projeção, e a quebra de ligação entre a borracha dos pneus e a água.

Quando se realizam ensaios de avaliação do ruído, de modo a assegurar que estes são válidos, existe uma série de parâmetros a verificar. No caso do método adotado nesta dissertação, o

método CPX, recomenda-se que a velocidade do vento seja inferior a 5 km/h, a temperatura ambiente esteja compreendida entre os 5 e os 30°C, a superfície do pavimento esteja seca e a uma temperatura entre os 5 e os 50°C.

3.4. Comportamento dos condutores

O ruído gerado pelos veículos é significativamente afetado pelo comportamento dos condutores e pela sua forma de condução.

A influência da forma de condução está diretamente ligada com a velocidade, a mudança engrenada, e se o veículo se encontra em aceleração ou desaceleração, fatores estes que, como já se mostrou anteriormente, têm ação na fonte sonora. Um mesmo veículo numa mesma superfície pode gerar ruídos diferentes, pois os ambientes rodoviários proporcionam condições diversas, e todos os condutores reagem de maneira diferente a uma determinada situação. A Figura 20 revela a diferença de valores de L_{Amax} obtidos, numa superfície de mistura betuminosa densa, em condições de aceleração e em velocidade cruzeiro, verificando-se que, para todas as velocidades, o L_{Amax} é superior em condições de aceleração.

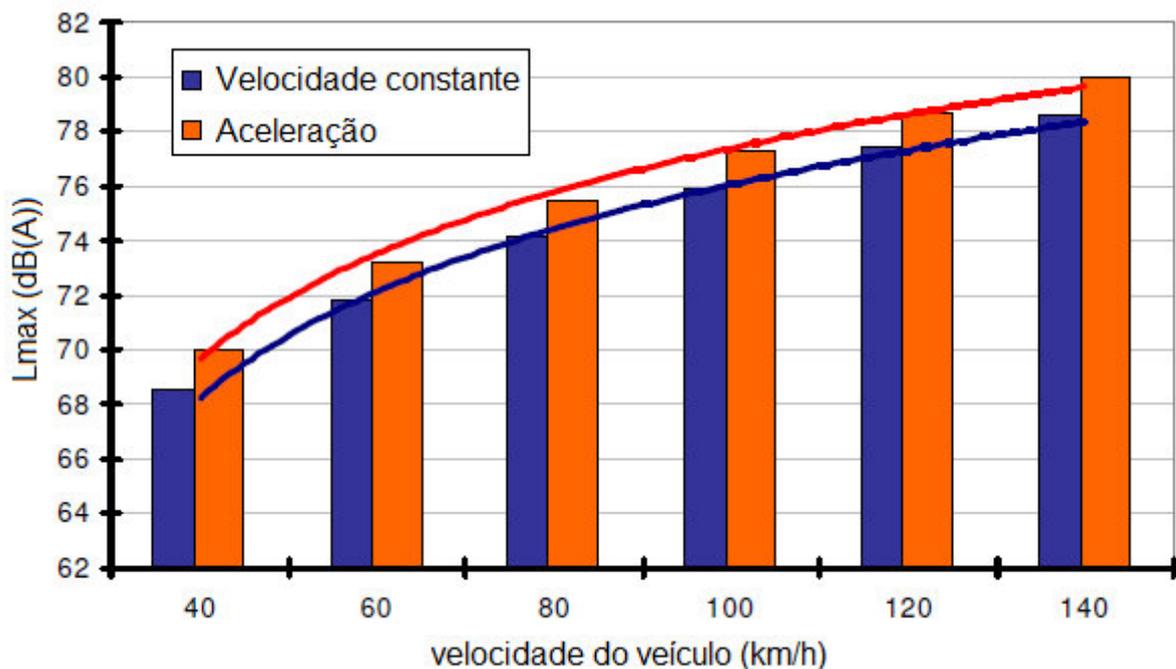


Figura 20 – Comparação dos níveis de L_{Amax} de diferentes velocidades, em condições de aceleração e de velocidade constante (Pucher et al., 2006)

Outros comportamentos com influência no ruído estão relacionados com a manutenção dos veículos, como o estado de conservação dos seus elementos ou o controlo da pressão dos pneus. Estes não estão diretamente ligados à condução, mas tem efeito no comportamento geral do veículo, e logo no som gerado pelo seu funcionamento e circulação.

4. DETEÇÃO E INCÓMODO DO RUÍDO DO TRÁFEGO

4.1. Princípios básicos

A deteção dos veículos é audiovisual, isto é, existe uma integração das diferentes características dos veículos, desde as características visuais, como a cor, a forma e o movimento do carro, e a sua componente acústica. Uma deteção atempada geralmente é feita através da pista auditiva dos veículos, logo o conjunto de ruídos gerados por estes fazem parte de uma componente essencial do processo de deteção dos veículos, e consequente ação. Por exemplo, no processo de aproximação de uma passagem de peões com pouca visibilidade, a deteção do ruído do veículo pode ser crucial no processo de perceção-ação, levando o peão a decidir se deve ou não atravessar a via de tráfego (Barton et al., 2012).

A incomodidade é um conceito subjetivo pois, para além do conteúdo espectral do ruído, este depende das pessoas, das suas características e vivências, dos locais, e do momento da exposição ao ruído (Paunović et al., 2009). Um ruído geralmente incomoda se, por exemplo, mascarar um sinal que se pretende ouvir, estiver associado a circunstâncias desagradáveis, for muito forte, ou incompreensível. São várias as situações que podem gerar sensação de incómodo devido ao efeito do ruído, sendo que o ruído é mais frequentemente apontado como responsável da incomodidade de um maior número de pessoas. Os níveis de pressão sonora do ruído do tráfego rodoviário não danificam o sistema auditivo, mas são várias as consequências que têm na saúde, nomeadamente a nível de incómodo e stress (IA, 2004).

4.2. Fatores que afetam a deteção e a incomodidade

Os níveis de deteção auditiva de veículos que se encontram em aproximação e o incómodo provocado no recetor dependem dos níveis de ruído gerados, como tal dependem de todos fatores anteriormente mencionados no capítulo 3. Porém, existem outros fatores cruciais para a deteção e para incómodo, os quais se relacionam com as características do recetor e do ambiente sonoro. As características dos recetores estão diretamente relacionadas com as suas características psicológicas e a sua capacidade auditiva, a qual depende da experiência, atividades e idade dos indivíduos (Carvalho e Rocha, 2008). A ação do ambiente sonoro também não pode ser desprezada, sobretudo devido ao seu efeito de mascaramento na fonte.

4.2.1. Influência da idade dos indivíduos

A capacidade auditiva de cada individuo vai variando ao longo de toda a sua vida. Esta alteração dos níveis auditivos deve-se por um lado aos ambientes acústicos a que cada um está sujeito, logo às suas atividades e experiências de vida, mas também ao próprio avanço da idade e consequentes alterações sofridas.

Foi efetuado um estudo de deteção de veículos (Mendonça et al., 2013) a um grupo de indivíduos voluntários, com idades compreendidas entre os 7 e os 86 anos, divididos em 4 grupos etários: adolescentes (19 anos ou menos), jovens (dos 20 aos 39 anos), adultos (dos 40 aos 59 anos) e idosos (60 anos ou mais). Neste estudo os participantes tinham que detetar os veículos em aproximação sob condições controladas de laboratório, e através de amostras de ruído gravadas usando várias combinações com diferentes tipos de veículos, pavimentos e velocidades. A análise dos dados revelou uma clara diferença entre os grupos etários, sendo a percentagem de deteção média de 78,27% para os adolescentes, 87,93% para os jovens, 79,84% para os adultos, e 72,88% para os idosos, com uma deteção média global obtida de 80,51%. Estes valores permitem perceber a variação da capacidade auditiva para as diferentes faixas etárias, e percebe-se que os maiores níveis de deteção ocorrem em idades entre os 20 e os 39 anos. Pode considerar-se a idade um fator crítico na deteção auditiva dos veículos, sendo que os utentes mais vulneráveis, como as crianças e os idosos detetam de forma menos eficiente os veículos em ambientes ruidosos (Mendonça et al., 2013).

A Figura 21 mostra as percentagens de deteção médias, dos diferentes grupos etários, em três tipos de pavimento: em mistura betuminosa aberta com borracha, mistura betuminosa densa e em cubos de granito.

Ao contrário do que acontece na deteção de veículos, a idade não é um fator crítico na classificação do incómodo causado pelo ruído do tráfego. Deste modo, o ruído afeta todos os grupos etários da mesma forma, sendo por isso difícil usar a idade como critério de gestão do ruído do tráfego.

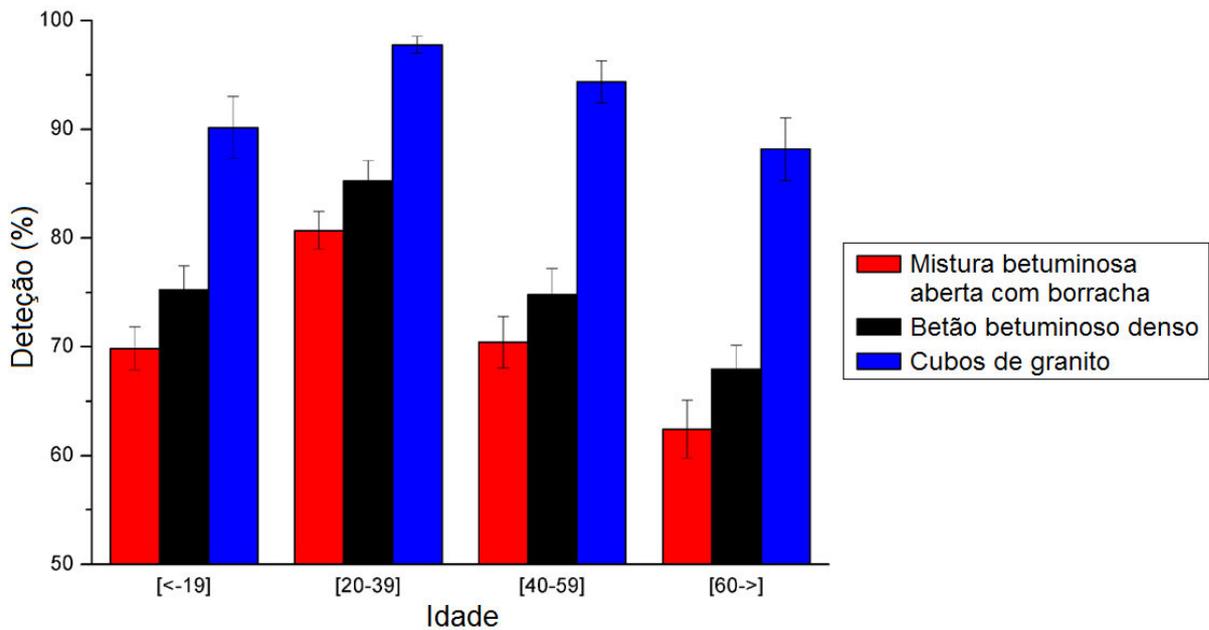


Figura 21 – Percentagem da deteção média por pavimento e faixa etária (Mendonça et al., 2013)

Num estudo semelhante ao da deteção, onde se pretendia avaliar o incómodo provocado pelo ruído rodoviário (Freitas et al., 2012b), os resultados foram semelhantes em todos os grupos etários. Numa escala de 1 a 10 (em que 1 correspondente ao pouco incómodo e o 10 ao extremamente incómodo), foram obtidos valores médios de incómodo de 5,59 para os adolescentes, 5,79 para os jovens, 5,47 para os adultos e 5,60 para os idosos. Este estudo revelou uma alta consistência das taxas de incómodo em função das principais variáveis influentes (pavimentos, velocidade e composição do tráfego).

4.2.2. Influência do ruído de fundo

O ruído de fundo do local tem um grande efeito na deteção de veículos, uma vez que mascara a fonte sonora, isto é, dificulta a audição do veículo. Numa situação de deteção num ambiente rodoviário, ao som gerado pelo veículo é chamado de sinal, e o som que mascara o sinal é o ruído.

O nível de mascaramento depende da localização espacial do sinal, da sua intensidade, que é influenciado principalmente pelo tipo de pavimento, tipo de veículo e a sua velocidade, e depende da intensidade do ruído de mascaramento. Geralmente quando o sinal e o ruído têm origens diferentes o mascaramento é menor, pois sons com as mesmas características e propriedades físicas são mais difíceis de distinguir. A relação que o ruído de fundo tem na

deteção é perceptível na Figura 22, havendo uma clara redução da percentagem de deteção com o aumento dos níveis de ruído de mascaramento.

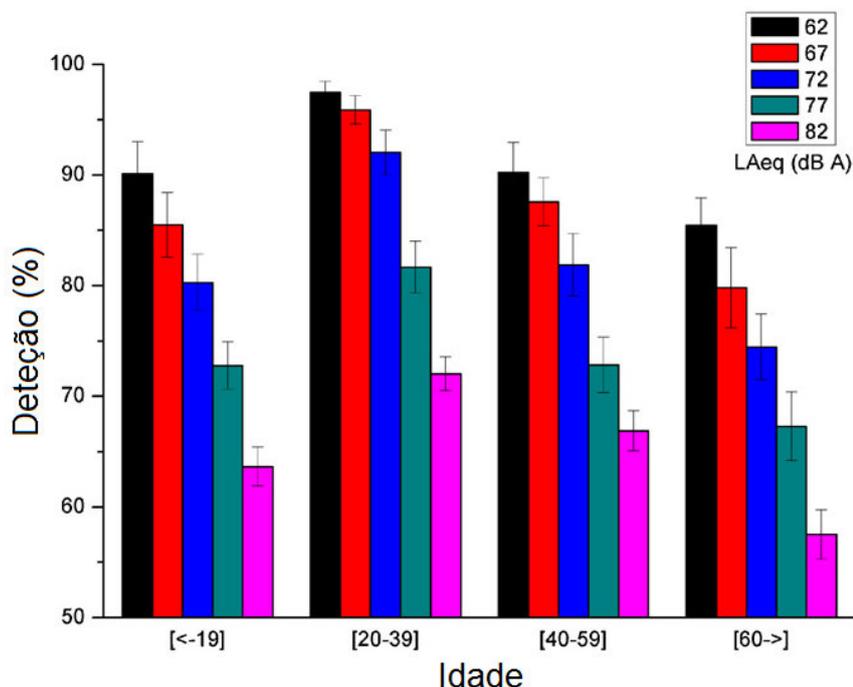


Figura 22 – Percentagem média de deteção com diferentes níveis de ruído de fundo para os diferentes grupos etários (Mendonça et al., 2013)

Os resultados de um estudo da detetabilidade média (Mendonça et al., 2013) revelam que em ambientes com ruído ambiental de 77 dB(A) a deteção de veículos está perto do limiar dos 75%. Os ambientes mais ruidosos com valores de deteção inferiores ao ruído ambiente são mais perigosos, enquanto os ambientes mais silenciosos geralmente são mais seguros. Como tal, em ambientes com mais ruído de mascaramento, por questões de segurança, é importante que os veículos produzam ruído suficiente para serem facilmente detetados.

O ruído de fundo, ao mascarar uma fonte de informação desejada, dificulta a sua deteção e percepção, ou ainda a comunicação como quando se trata, por exemplo, de uma conversa (IA, 2004). Esta dificuldade ou impedimento provocado pelo mascaramento provoca naturalmente incómodo no ouvinte, sendo frequente em ambientes rodoviários, principalmente com volumes de tráfego elevado. O efeito de mascaramento é um fenómeno psicoacústico presente na vida cotidiana que explica a inaudibilidade de um som na presença de um outro. Geralmente ocorre quando os sinais que chegam ao ouvido humano estimulam a membrana basilar em pontos pertencentes à mesma banda crítica (Osses et al., 2010).

4.3. Deteção de veículos versus incomodidade

Existe cada vez mais preocupação com a arquitetura e estruturação das cidades e consequentemente o seu conforto e acessibilidade. Por esta razão são várias as cidades a fazer reestruturações com vista a melhorar a sua arquitetura, as condições de acesso e circulação do tráfego e ainda a qualidade do ambiente. A crescente preocupação com a qualidade do ambiente das cidades leva a uma maior análise do ruído, tornando importante equacionar os fluxos de tráfego, limites de velocidade, estacionamentos e tipos de pavimento. É importante estudar as diferentes zonas, de modo a perceber onde é necessário reabilitar o pavimento, e onde é vantajoso o uso de pavimentos mais silenciosos, ou até mesmo de superfícies mais ruidosas, como por exemplo em zonas próximas de passagem de peões (McDade et al., 2012).

Percebe-se então que se por um lado existe uma necessidade de baixar os níveis de ruído resultante do tráfego rodoviário por uma questão de qualidade do ambiente e bem-estar das populações, por outro lado a falta deste reduz os níveis de deteção, podendo dar origem a um maior número de conflitos e acidentes. Ou seja, o ruído do contacto dos pneus com o pavimento e do motor pode ser usado como sinais por peões e ciclistas, permitindo uma melhor percepção da velocidade e da proximidade do veículo, evitando desta forma conflitos através reações oportunas.

A combinação de pavimentos de baixo ruído com veículos totalmente elétricos ou híbridos, além de reduzir de forma clara o nível de ruído, pode representar uma grave ameaça para a segurança dos utentes vulneráveis da estrada, pois a interação simultânea dos fatores restringe a deteção dos veículos. Os motores mais ruidosos, apesar de mais suscetíveis a causar incómodo, são mais detetáveis. Portanto, a partir deste ponto de vista, não existe uma solução ótima relativamente ao veículo tipo. Foram apostadas algumas soluções, tais como a introdução de som em veículos mais silenciosos, mas tais soluções irão reintroduzir algum ruído ambiental com reações psicológicas imprevisíveis. Enquanto essas soluções ainda estão em debate, e são de difícil análise e aplicação, terão de se solicitar outras abordagens (Mendonça et al., 2013).

Um estudo estatístico dos Estados Unidos parece sugerir que os veículos de funcionamento elétrico provocam relativamente mais acidentes envolvendo peões do que os veículos de combustão interna. No entanto, vários estudos nos EUA, Japão e Europa não confirmam esta relação. Além disso, os veículos silenciosos existiam no trânsito urbano já muitos anos antes

dos carros híbridos se tornarem comuns. Se a tranquilidade criaria acidentes, isto deveria ter sido aparente já anteriormente, e não ser algo que ocorreu somente quando os veículos híbridos entraram no mercado (Sandberg, 2012).

4.4. Desenvolvimento de alternativas para redução do ruído

O aumento dos níveis de ruído do tráfego rodoviário e o seu impacto negativo, principalmente em espaços urbanos, levou várias administrações rodoviárias a desenvolver ações de avaliação e de correção no sentido de os reduzir, conferindo um maior conforto e conseqüentemente uma melhor qualidade ambiental.

Uma das medidas mais adotadas para a redução de ruído do tráfego é a implementação de barreiras acústicas. Estas são colocadas entre uma fonte sonora e um recetor com o objetivo de reduzir o nível do sinal que se propaga entre estes, protegendo deste modo zonas sensíveis próximas de ambientes rodoviários. A sua eficácia depende de fatores como a sua geometria, as características acústicas dos materiais, a qualidade da instalação, a sua deterioração ao longo do tempo, a geometria do local onde são instaladas as barreiras, as características acústicas do local, e as condições meteorológicas (Fonseca et al., 2008). As barreiras podem ser construídas com diferentes dimensões e materiais (Figura 23), desde que proporcionem um isolamento sonoro eficaz, uma boa reflexão e absorção sonora, e dimensão suficiente para evitar a difração do som pelo topo ou pelos lados.



Figura 23 – Exemplos de barreiras acústicas (Bragança et al., 2006)

A partir dos anos 80 foram implantadas políticas de controlo do ruído, porém as políticas de redução do ruído na fonte só foram contempladas recentemente, levando as administrações rodoviárias e os construtores a aplicar medidas de mitigação do ruído, e obrigando à avaliação da qualidade dos pavimentos relativamente à geração ruído (Freitas et al., 2012a). Isto levou ao

desenvolvimento de alternativas como pavimentos de baixo ruído e motores de veículos elétricos ou híbridos, surgindo desta forma uma perspectiva otimista sobre a redução do incómodo e melhoria da saúde devido a um ambiente rodoviário mais silencioso, em particular para as populações que vivem em áreas urbanas.

Os pavimentos de baixo ruído tornaram-se a medida de mitigação do ruído rodoviário eleita entre as administrações rodoviárias devido à ação direta que tem na fonte de geração de ruído. Uma camada superficial pode ser considerada de baixo ruído se o nível gerado na interação pneu-pavimento, quando comparado com outra camada superficial de utilização corrente tomada como referência, é inferior em pelo menos 3 dB(A) (Sandberg e Ejsmont, 2002).

O recente aparecimento de veículos elétricos e híbridos no mercado promete um avanço na redução do ruído na comunidade urbana. A emissão de ruído muito baixo por motores elétricos significa que o ruído por unidade de potência é quase nulo para veículos elétricos e veículos híbridos, restando apenas o ruído dos pneus (Sandberg, 2012).

O ruído do tráfego rodoviário tornou-se um dos principais fatores de degradação da qualidade de vida das populações, e tende a agravar-se com o incremento dos níveis de tráfego rodoviário causado pelo aumento da mobilidade das populações, mas sobretudo devido ao desenvolvimento desequilibrado dos espaços urbanos (Mendes e Silva, 2006). Assim, um eficaz planeamento urbano faz parte das medidas de redução do ruído. São exemplos de medidas mitigadoras de ruído a reordenação dos sentidos de tráfego, a alteração do traçado vertical e horizontal, a definição de zonas protegidas, a limitação da velocidade em função do nível de ruído (Freitas, 2008), a criação de pequenas vias para autocarros e de acesso a parques de estacionamento subterrâneos (McDade et al., 2012).

5. PERCEÇÃO DE RUÍDO DE TRÁFEGO RODOVIÁRIO

5.1. Considerações gerais

Nos últimos anos o ruído de tráfego rodoviário tem sido alvo de inúmeros estudos, muito por causa das repercussões que tem na saúde e no bem-estar, mas também devido à sua importância para a deteção de veículos e conseqüente segurança rodoviária. As atuais políticas de controlo de ruído atuam nas fontes, como tal obrigam à avaliação da qualidade dos pavimentos relativamente ao ruído pneu-pavimento (Freitas et al., 2012a). Assim, este trabalho pretende avaliar, através do método da proximidade imediata, diferentes tipos de pavimento com base nos indicadores acústicos e psicoacústicos obtidos nos ruídos pneu-pavimento adquiridos.

Neste capítulo são descritas as metodologias das aquisições do ruído contacto pneu-pavimento, do processamento e análise dos resultados, e da tarefa de perceção da intensidade do ruído. Para cada uma das metodologias, são expostos os equipamentos e softwares adotados, e quais as suas funções. Apresentam-se também o pneu e os pavimentos selecionados para análise.

5.2. Aquisição do ruído contacto pneu-pavimento

Neste estudo, para a aquisição do ruído dos diferentes pavimentos a avaliar, adotou-se o método da proximidade imediata (CPX), segundo a norma ISO/DIS 11819-2:2012 “Acoustics – Method for measuring the influence of road surfaces on traffic noise – Part 2: Close-proximity method”. Foram selecionados oito trechos com diferentes tipos de pavimento, obedecendo aos critérios impostos pela norma. Isto é, secções de estrada com mais de 20 m e de preferência mais longa que 100 m, secção sem curvas de raio inferior a 250 m para velocidades até os 50 km/h, e a existência de pelo menos 10 m de mesmo tipo de superfície antes da secção a analisar começar.

As aquisições foram feitas em oito tipos de pavimento: Betão Betuminoso (BB), Blocos de Cimento de 20 por 10 cm (BC), Cubos de Granito de 10 por 10 cm (CG), Microaglomerado Betuminoso a Frio (MBF), Lajes de Granito (LG), Mistura Betuminosa aberta com betume modificado com Borracha (MBB), Mistura Betuminosa Aberta com Betume Modificado com média percentagem de Borracha (MBAB), e Mistura Betuminosa de Granulometria Descontínua (MBGD) (Figura 24).



Figura 24 – Pavimentos escolhidos para as aquisições

Foram feitas aquisições a velocidades dos 20 aos 90 km/h. Porém, devido ao facto do ruído do tráfego rodoviário ser mais preocupante em meios urbanos, optou-se por apenas estudar as velocidades de 20, 30, 40 e 50 km/h, pois são as mais praticadas em meios de maior afluência de peões. Para além disso, alguns dos trechos não permitem a prática de velocidades muito superiores a 50 km/h, como é o caso das estradas em cubos de granito, lajes de granito e blocos de cimento, pois são locais com grande afluência de peões, logo para prática de velocidades reduzidas.

A aquisição do ruído gerado pela interação pneu-pavimento foi realizada com recurso a dois microfones Free-fiel ½ Type 4190 conectados à plataforma portátil Pulse Type 3560-C através de cabos AO-0419, tudo da Brüel & Kjær. A plataforma Pulse era alimentada por uma bateria portátil, e conectada, através de um cabo de rede, a um computador portátil. Os ensaios foram feitos com uma carrinha Nissan Primastar, e um atrelado equipado com 2 pneus Continental ContiEcoContact3 195/65-R15 (Figura 25).



Figura 25 – Pneu ContiEcoContact3 195/65-R15

Optou-se pela utilização deste pneu pois este faz parte de um conjunto de pneus comercialmente disponíveis, e que detêm as condições para ser substitutos do pneu de referência padrão da norma ISO 11819-2:2000 (Morgan et al., 2009). Todos os pneus obtiveram um bom desempenho (Schwanen et al., 2008), e apesar de este não ter sido o pneu selecionado no final dos testes, este é o que se encontra atualmente disponível no mercado nacional.

A disposição dos microfones foi feita de acordo com os critérios impostos pela norma ISO/DIS 11819-2, 2012. Como foram utilizados apenas dois microfones, estes foram colocados na parte lateral do pneu com uma orientação de 45°, a 20 cm de distância do pneu e do seu centro, e a 10 cm da superfície do pavimento, assim como se pode comprovar na Figura 26.

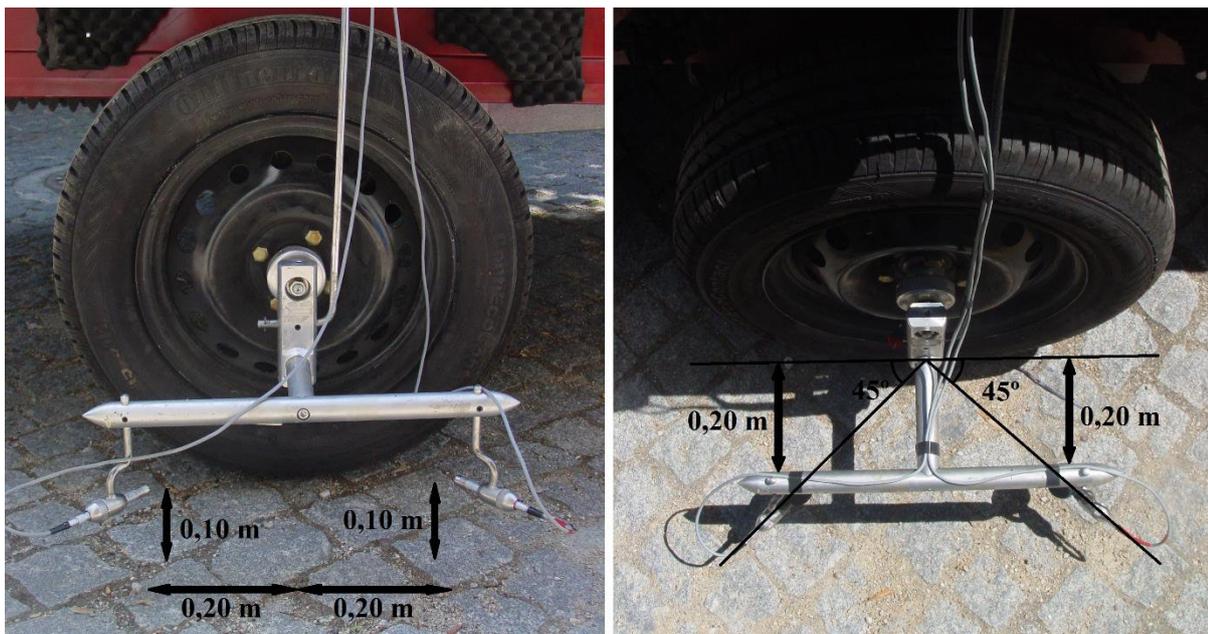


Figura 26 – Posição dos microfones para a medição pelo método CPX (ISO/DIS 11819-2:2012)

Os microfones foram conectados à plataforma Pulse, que por sua vez estava ligada ao computador portátil com o qual se controlavam as aquisições sonoras através do software Labshop 14.1.1 da Brüel & Kjær. A Figura 27 apresenta todo o sistema montado e pronto a iniciar as aquisições.



Figura 27 – Carrinha e atrelado com todo o esquema de montagem dos microfones e da plataforma Pulse

Uma das variáveis com mais importância neste ensaio é a velocidade de circulação. Assim, a velocidade do veículo era verificada com um radar de velocidade tipo pistola da Bushnell. A temperatura do ar e do pavimento, e a velocidade do vento também são variáveis influentes neste tipo de ensaio. Assim, antes do início das aquisições, estes parâmetros foram medidos. 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 28).

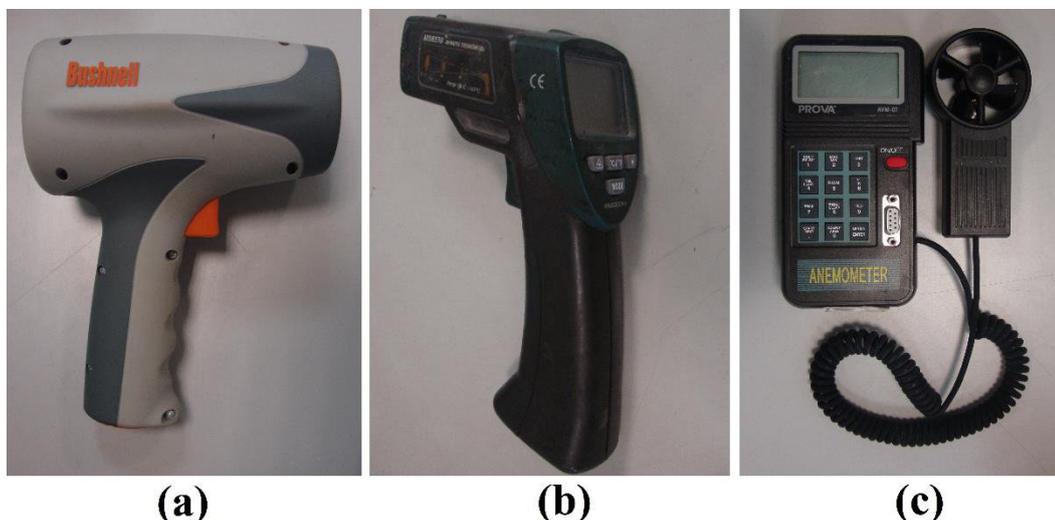


Figura 28 – Radar de velocidade to tipo pistola (a), Termómetro infravermelho de pistola (b), Anemómetro de fluxo digital (c)

Sempre que o trecho permitia, as aquisições eram feitas durante 20 segundos ou mais, e sempre que necessário eram repetidas até obter gravações com o mínimo de ruídos indesejáveis. Todas as aquisições foram feitas no Verão, não existindo por isso impedimentos relativamente às temperaturas e velocidade do vento.

5.3. Processamento e análise de dados

Todos os ficheiros adquiridos pelo software Labshop foram escutados e analisados, de forma a seleccionar os ficheiros com menos ruídos indesejáveis. Como grande parte das gravações tinham uma duração aproximadamente igual ou superior a 30 segundos, foi utilizado o software Audacity 2.0.3 para cortar os ficheiros, seleccionando-se as secções de melhor qualidade e sem ruídos pontuais, obtendo assim ficheiros com aproximadamente 10 segundos.

De modo a retirar os indicadores acústicos de cada uma das amostras gravadas, foi necessário utilizar um ficheiro de calibração. Para tal utilizou-se um ruído branco, um ruído constante resultante de um conjunto de ondas sonoras diferentes, isto é, um sinal que apresenta igual potência dentro de qualquer banda de frequência, com uma largura fixa. Com recurso ao

manequim Head and Torso Simulator (HATS) da Brüel & Kjær modelo 4128-D, à plataforma Pulse, e ao software Labshop, foi obtido o nível de pressão sonora do ruído branco em dB(A). O HATS inclui um simulador de orelha direita tipo 4158-C e um simulador de orelha esquerda tipo 4159-C, e encontra-se conectado à plataforma Pulse (Figura 29).



Figura 29 – HATS com os simuladores de orelha

Tendo um ficheiro de calibração à disposição foi então possível obter os respetivos níveis de pressão sonora e do loudness para cada amostra de som em estudo. Optou-se por apenas estudar o indicador psicoacústico loudness pois ficou provado que este é a melhor medida acústica para prever a deteção de veículos e o incómodo causado pelo ruído do trafego rodoviário (Mendonça et al., 2013).

Os valores de loudness e do nível de pressão sonora foram determinados através da aplicação PsySound3, executado no software MatLab 7.13.0.564 (Cabrera et al., 2008). Este software fornece uma plataforma acessível para a análise das gravações sonoras utilizando procedimentos aplicados em acústica e psicoacústica (Cabrera et al., 2007), e funciona em 4 passos. No passo 1 (Files) são selecionados os ficheiros, no passo 2 (Calibration) faz-se a seleção do ficheiro de calibração e indica-se o respetivo nível de pressão sonora, no passo 3 (Analysers) são selecionadas as análises que se pretende usar nos ficheiros, por último, o passo 4 (Post Processing) fornece um resumo básico dos resultados de cada ficheiro. Todos os ficheiros foram calibrados com o mesmo ficheiro de calibração de 77.3 dB(A), e as análises selecionadas foram, Sound Level Meter, Dynamic Loudness (C & F) e Loudness (MG & B).

Segundo a descrição da aplicação PsySond3, o Sound Level Meter “emula um medidor de nível de som com filtros de ponderação selecionados pelo utilizador da aplicação (A, B, C, Z) e tempos de integração (rápido e lento). Os dados calculados são séries de tempo correspondente às configurações de análise selecionados”. Os resultados obtidos no PsySound3 são todos os valores ao longo do espectro. Assim sendo, com recurso ao software MatLab, os valores de L_{eq} resultam da média do nível sonoro ao longo da medição, enquanto que os valores de L_{max} são o nível máximo de pressão sonora de todo o espectro, ambos os resultados expressos em dB(A) SPL.

O nível de pressão sonora (SPL - Sound Pressure Level) é uma medida logarítmica da pressão sonora efetiva de um som em relação ao valor de referência. É medido em decibéis (dB) acima de um nível de referência padrão. A pressão sonora de referência do ar, neste caso é de 20 μ Pa (micro Pascal), valor geralmente considerado o limiar de audição humana a 1 kHz de frequência (Ostergaard, 2003).

Tal como já foi feito em estudos anteriores (Mendonça, 2012), o modelo de cálculo do loudness do software PsySound3 escolhido foi o Dynamic Loudness (C & F), modelo de Chalupper e Fastl. No entanto, existem muitos modelos para predizer a sensação subjetiva de loudness, logo optou-se por estudar também o modelo de Moore, Glasberg e Baer.

Os modelos de loudness utilizados em psicoacústica podem ser divididos entre aqueles que usam filtros auditivos Bark (escala que varia de 1 a 24 e corresponde às primeiras 24 bandas críticas da audição) e filtros auditivos Erb (mostra a relação entre o filtro auditivo, a frequência e a largura de banda crítica). Ambas as escalas têm conceitos semelhantes, no entanto para os filtros Erb as larguras de banda são mais estreitas do que as dos filtros Bark, e a distribuição de filtro difere particularmente para frequências abaixo de 500 Hz (Cabrera et al., 2007).

Para obter os valores de loudness segundo o modelo de Chalupper e Fastl utilizou-se um método standard (*Zwicker's Model* de soma de loudness – ISO 532-B) que é apresentado como uma metodologia gráfica para a análise da área sob a curva do loudness específico (Figura 30), expressa em Sones/Bark, em que Bark é a unidade de frequência da chamada escala da taxa de banda crítica z . A escala Bark apresenta uma relação linear entre a frequência z , em Barks, e um ponto específico de estimulação da membrana basilar da cóclea, expresso em mm (milímetros) (Osses et al., 2010).

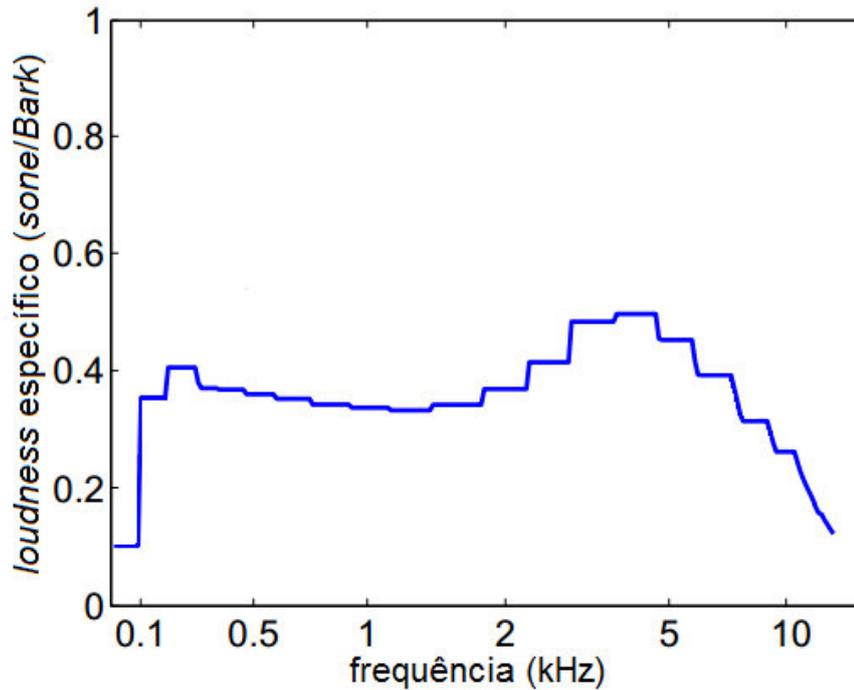


Figura 30 – Curva de loudness específico de um sinal acústico, expresso em sone/Bark e em função de Bark (Schlittenlacher et al., 2012)

O loudness específico exibe a distribuição de loudness através da banda crítica, e é expresso em sone/bark. O valor do loudness total de um sinal (em Sones) é dado pelo integral da curva de loudness específico ao longo do eixo de frequência z , segundo a Equação 6 (Osses et al., 2010).

$$S = \int_0^{24 \text{ Barks}} S' dz \tag{6}$$

Em que:

S é o loudness total expresso em sone

S' é o loudness específico expresso em sone/Bark.

A Figura 31 apresenta como exemplo a representação gráfica dos valores de loudness específico médio de um dos ruídos em estudo, obtidos pelo modelo Loudness CF do PsySound3, e calculado através do MatLab.

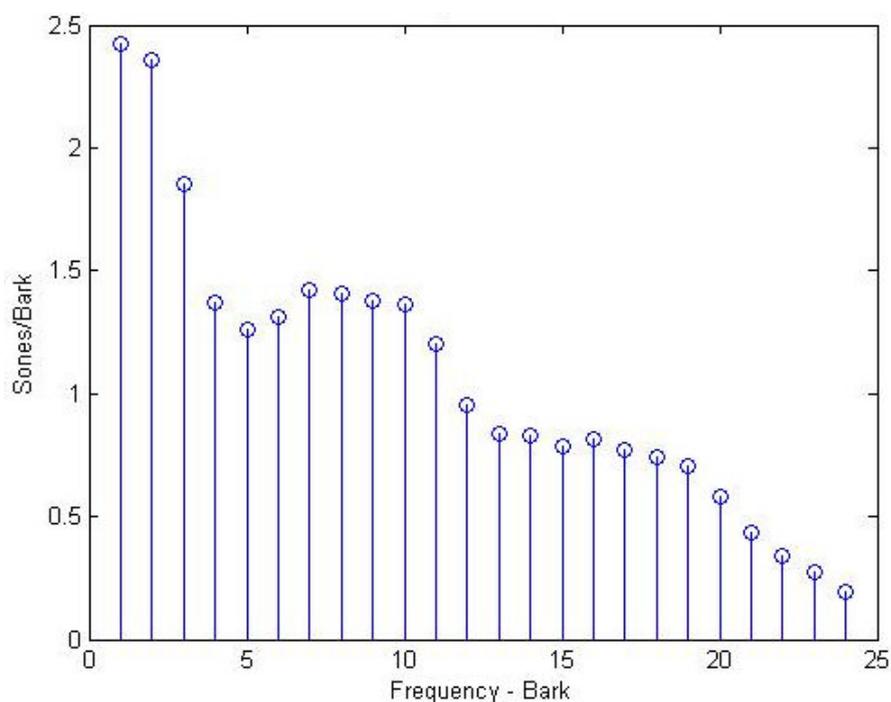


Figura 31 – Representação gráfica do loudness específico (expresso em sone/bark) médio obtido pelo modelo Loudness CF

O modelo de Moore, Glasberg e Baer é um modelo que estima o loudness numa variação temporal dos sons. Este usa a escala Erb (Equivalent Rectangular Bandwidth) de filtros auditivos mais estreitos, e os processos de integração temporal dados por Glasberg e Moore continuam a ser implementados. Os resultados são semelhantes em valores absolutos aos obtidos pela análise de Chalupper e Fastl, no entanto o modo de obtenção do loudness total é diferente (Cabrera et al., 2008). O valor de loudness total vai ser obtido por análise de uma série temporal obtida através do PsySound3.

A Figura 32 ilustra o gráfico da variação de loudness ao longo do espectro do mesmo ruído usado como exemplo anteriormente. Como é possível verificar pelo gráfico, os valores não são consistentes ao longo do eixo horizontal. Isto deve-se ao facto do ficheiro utilizado ter uma duração de 12 segundos, assim o resultado final de loudness é obtido através da média da seleção dos valores com conteúdo espectral.

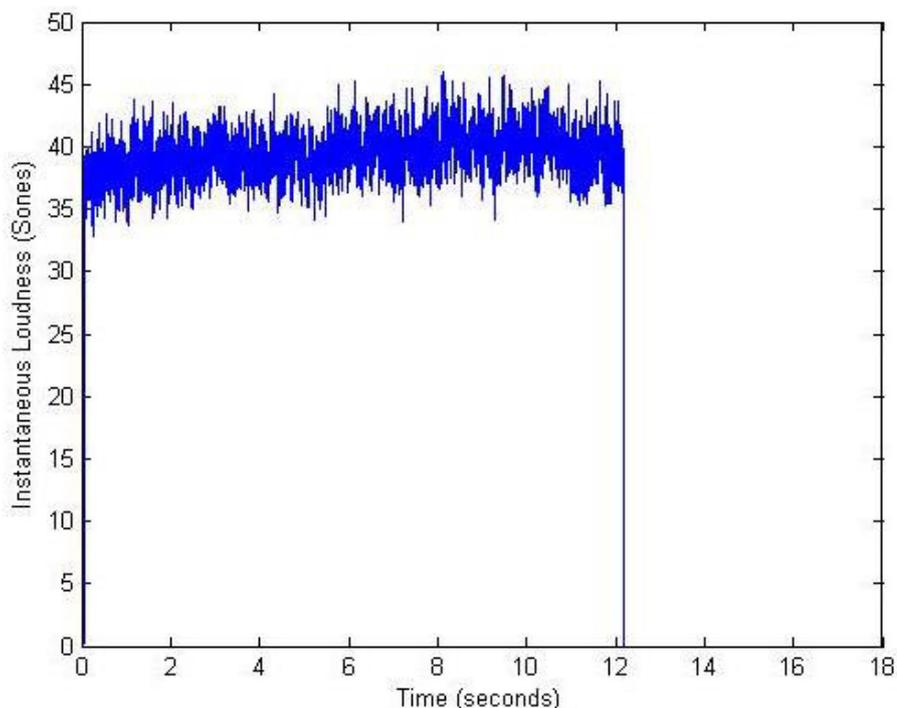


Figura 32 – Curva de loudness (expresso em sone) obtido pelo modelo Loudness MGB

Tal como grande parte dos programas de análise de som, o PsySound3 produz dados formatados como números individuais, conjunto de números (e.g., séries temporais, espectros temporais ou espectros simples) e gráficos. Os dados numéricos podem ser exportados para várias análises ou gráficos em outros programas, e os gráficos gerados pelo PsySound3 podem ser exportados para posterior edição, ou para usar noutra lugar (Cabrera et al., 2008). Neste caso todos os resultados do PsySound3 foram executados em MatLab.

5.4. Avaliação da percepção da intensidade do ruído pneu-pavimento

Tendo em conta que apenas se pretendia uma breve análise da intensidade sonora das aquisições, a avaliação da percepção da intensidade do ruído foi feita com recurso a tarefas de caracterização dos estímulos realizada a dois sujeitos voluntários. Ambos os participantes eram jovens, com idade próxima dos 20 anos, e com boa acuidade auditiva.

Nesta tarefa os participantes tiveram de avaliar a intensidade do ruído pneu-pavimento, tendo como objetivo a comparação das suas respostas com os níveis de pressão sonora e o loudness das aquisições de cada pavimento. Tendo em conta que na determinação do loudness é fundamental conhecer não só as propriedades físicas do som, mas também as características

auditivas, fisiológicas e psicológicas do ouvinte, esta tarefa permite obter uma relação entre os valores calculados computacionalmente e a avaliação real dos ouvintes.

Esta tarefa foi efetuada com recurso à aplicação Noiseless Player, em plataforma Linux, e executada num computador portátil Toshiba com placa de som Intel 82801BA-ICH2. A aplicação Noiseless Player permite a apresentação de estímulos sonoros e visuais consecutivos, registando as respostas dos participantes.

Todos os sons foram editados, de forma a obter estímulos com 5 segundos de duração, e o sistema foi calibrado de modo a garantir uma pressão sonora semelhante ao ruído gerado na interação pneu-pavimento. Esta calibração, tal como já tinha sido feito anteriormente, foi executada com recurso ao HATS, à plataforma Pulse e ao software Labshop, obtendo o nível de pressão sonora do mesmo ruído branco já utilizado. Esse valor obtém-se definindo diferentes níveis de amplificação na aplicação Noiseless Player, até que o estímulo sonoro, por este reproduzido, iguale o nível de pressão sonora do ruído branco. Para isso utilizaram-se uns Headphones Sennheiser HD 650 (os mesmos utilizados na tarefa de intensidade sonora) ligados ao computador, e colocados no manequim HATS (Figura 33).

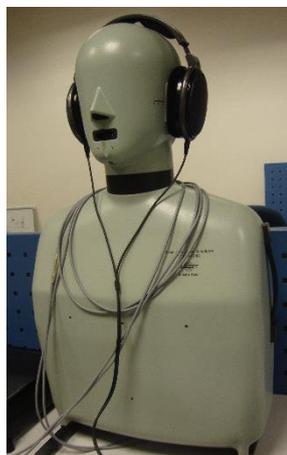


Figura 33 – HATS com os Headphones para a calibração da aplicação Noiseless Player

A tarefa de caracterização da intensidade dos estímulos sonoros foi realizada numa sala com ruído ambiente constante de 50 dB SPL. Os participantes realizaram o teste numa mesa equipada com um ecrã onde são apresentados os estímulos visuais, os Headphones, e um teclado usado para dar as respostas, todos eles conectados ligados ao computador portátil onde corria a aplicação Noiseless Player (Figura 34).



Figura 34 – Set-up experimental

Foram 32 os sons em análise, resultantes do ruído pneu-pavimento dos 8 pavimentos para 4 velocidades praticadas (20, 30, 40 e 50 km/h), todos com uma duração de 5 segundos. Cada estímulo tinha 5 repetições, logo cada participante foi exposto a um total de 160 estímulos.

Foram feitas duas tarefas de parametrização da escala de intensidade de modo a preparar os participantes para a tarefa. A escala de intensidade variava de 1 a 10, sendo que 1 corresponde a Pouco Intenso e 10 a Extremamente Intenso.

Numa primeira tarefa de treino foram apresentados aos participantes 4 estímulos, 2 com maior intensidade (os sons com o L_{Aeq} mais elevado), correspondentes ao ruído pneu-pavimento em cubos de granito e em lajes de granito a 50 km/h, e 2 com intensidade mais reduzida (os sons com o L_{Aeq} inferior), correspondentes ao ruído pneu-pavimento em betão betuminoso e em mistura betuminosa aberta com betume modificado com média percentagem de borracha a 20 km/h. Na segunda tarefa foram apresentados 4 estímulos do mesmo tipo de pavimento, com todas as velocidades praticadas, sendo usado para tal o ruído pneu-pavimento em betão betuminoso a 20, 30, 40 e 50 km/h.

O procedimento adotado nas tarefas de treino e na tarefa experimental foi o mesmo. Os estímulos eram reproduzidos de modo aleatório e acompanhados por uma apresentação visual. Esta apresentação era composta por duas imagens (Figura 35), uma imagem cinzenta apresentada aquando da reprodução do estímulo, e uma imagem preta usada no intervalo de cada estímulo.

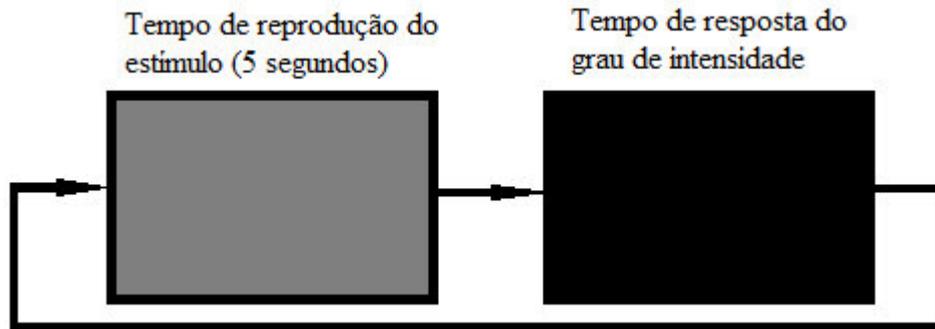


Figura 35 – Esquema da tarefa de classificação da intensidade

O intervalo inter-estímulos é o tempo que o participante usa para avaliar o som acabado de ouvir e a sua duração depende da velocidade de resposta do participante. Assim, com uma apresentação de 160 estímulos com 5 segundos de duração, mais o tempo dos intervalos de resposta, cada tarefa experimental teve uma duração de cerca de 15 minutos.

6. ANÁLISE DOS RESULTADOS

6.1. Método de Proximidade Imediata

A realização deste ensaio, segundo a norma ISO/DIS 11819-2:2012, teve por objetivo a análise da interação pneu-pavimento gerado por um tipo de pneu em oito tipos de superfícies de pavimento, apenas em condições de superfície seca. Neste capítulo será feita uma breve descrição das condições de ensaio e uma análise detalhada dos resultados obtidos nas aquisições de ruído.

A temperatura da superfície do pavimento apenas tem influência na produção de ruído em pavimentos betuminosos. Assim, as temperaturas da superfície e do ar apenas foram registadas nos locais relevantes. A Tabela 1 apresenta as várias temperaturas registadas no local, no momento em que se fizeram as aquisições.

Tabela 1 – Temperaturas obtidas nos diferentes trechos com pavimento de mistura betuminosa

Temperatura (°C)	BB	MBF	MBB	MBAB	MBGD
Ar	28.4	20.2	26.0	26.0	22.1
Pavimento	44.6	33.1	40.0	41.5	34.0

Apesar das aquisições terem sido efetuadas em dias diferentes, as datas foram próximas e as condições meteorológicas foram sempre semelhantes. Como tal, 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 involucrio em torno do microfone e do pneu.

6.1.1. Indicadores acústicos e psicoacústicos do ruído dos diferentes tipos de pavimento em função da velocidade

Na Tabela 2 apresentam-se os resultados dos níveis de pressão sonora máximos e equivalentes e o loudness (calculado a partir do modelo de Chalupper e Fastl) obtidos nas aquisições feitas, para a gama de velocidades de circulação compreendida entre os 20 km/h e os 50 km/h, nos oito tipos de pavimento em estudo.

Tabela 2 – Níveis de pressão sonora e loudness para cada tipo de pavimento e velocidade de circulação

Pavimento	Velocidade (km/h)	L_{eq} (dB(A) SPL)	L_{max} (dB(A) SPL)	Loudness (Sone)
BB	20	71,6	72,7	25,6
	30	78,9	79,9	33,8
	40	82,6	83,7	41,5
	50	87,3	88,2	54,7
BC	20	73,8	75,5	30,7
	30	80,8	83,7	43,8
	40	87,3	89,8	56,5
	50	91,8	94,2	70,6
CG	20	78,7	81,0	40,4
	30	85,8	87,3	56,1
	40	90,9	93,3	71,5
	50	94,8	96,2	86,1
MBF	20	76,4	77,8	34,4
	30	82,7	83,8	45,4
	40	86,7	87,9	55,2
	50	91,4	92,8	68,5
LG	20	76,5	77,6	34,6
	30	83,5	85,5	48,2
	40	88,8	90,7	63,1
	50	92,0	93,8	74,9
MBB	20	74,5	75,6	28,1
	30	81,5	82,6	37,5
	40	85,6	86,7	46,0
	50	89,9	91,4	58,9
MBAB	20	72,4	74,0	24,1
	30	78,2	79,8	33,0
	40	83,4	85,0	42,5
	50	86,7	87,7	51,1
MBGD	20	75,8	76,7	30,5
	30	80,7	81,4	37,1
	40	85,1	85,7	47,2
	50	89,2	90,4	57,9

A Figura 36 apresenta a relação dos níveis de pressão sonora máximos obtidos nos oito tipos de pavimento, nas diferentes velocidades de circulação.

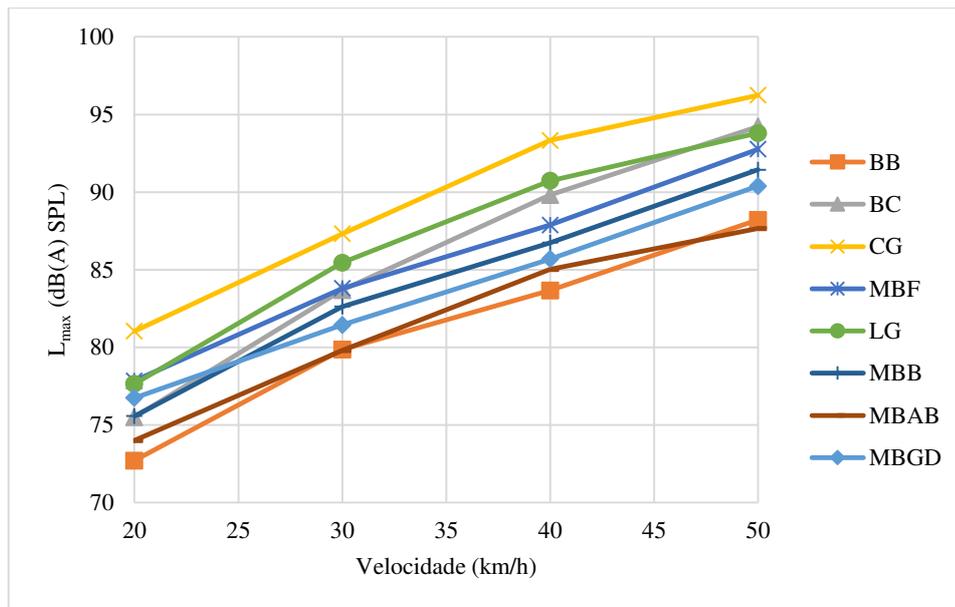


Figura 36 – Gráfico da variação do L_{Amax} com a velocidade para cada pavimento

Os valores de L_{Amax} calculados revelam valores superiores no pavimento em cubos de granito em todas as velocidades, verificando-se a 50 km/h o nível de pressão sonora máximo de 96,2 dB(A). A esse valor segue-se o L_{max} de 94,2 dB(A) a 50 km/h em blocos de cimento, apesar deste pavimento revelar níveis inferiores aos do pavimento em lajes de granito a 30 e 40 km/h, e o terceiro valor mais baixo a 20 km/h.

O menor valor de L_{max} é de 72,7 dB(A) e foi obtido a 20 km/h num pavimento de betão betuminoso. No entanto, esta superfície de pavimento não apresenta os valores inferiores para todas as velocidades praticadas. A 30 km/h e a 50 km/h os menores valores de L_{Amax} correspondem à mistura betuminosa aberta com betume modificado com média percentagem de borracha, e são de 79,8 e 87,8 dB(A), respetivamente. A variação entre o maior e o menor valor de L_{max} , entre todas as condições de circulação, é de 23.5 dB(A).

A Figura 37 apresenta a relação dos níveis de pressão sonora equivalentes obtidos nos oito tipos de pavimento nas diferentes velocidades de circulação.

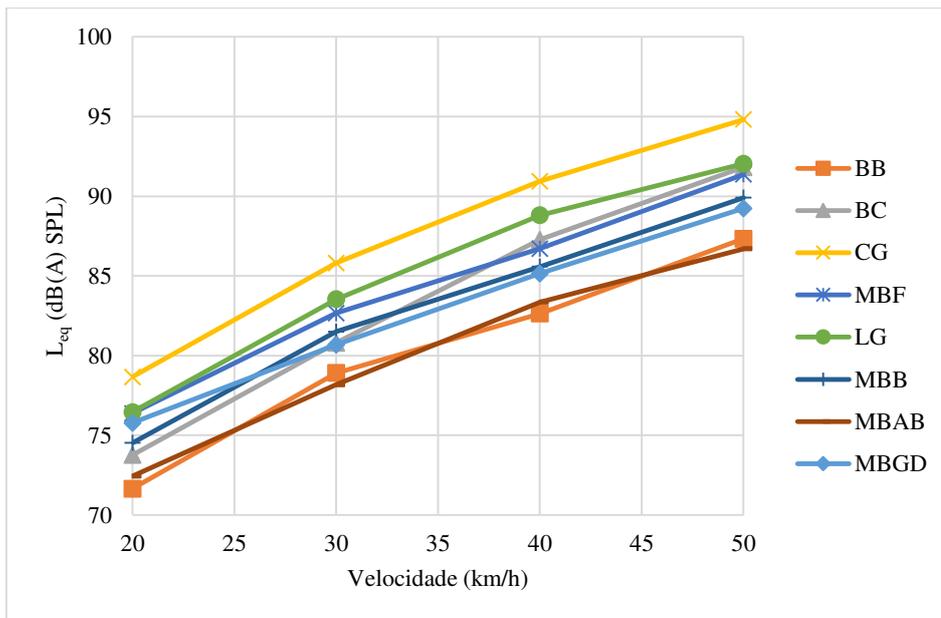


Figura 37 – Gráfico da variação do L_{Aeq} com a velocidade para cada pavimento

Neste caso os níveis de pressão são superiores no pavimento em cubos de granito a todas as velocidades, seguindo-se as lajes de granito, sendo que o maior valor de L_{eq} é de 78,7 dB(A) e correspondente à circulação a 50 km/h em cubos de granito.

Os menores valores das diferentes velocidades, tal como acontece com L_{Amax} , variam entre o betão betuminoso (menores a 20 km/h e 40 km/h) e a mistura betuminosa aberta com betume modificado com média percentagem de borracha (menores a 30 km/h e 50 km/h). A variação entre o maior e o menor valor de L_{eq} é de 23 dB(A).

A Figura 38 apresenta a relação dos valores do indicador psicoacústico loudness obtidos nos oito tipos de pavimento nas diferentes velocidades de circulação.

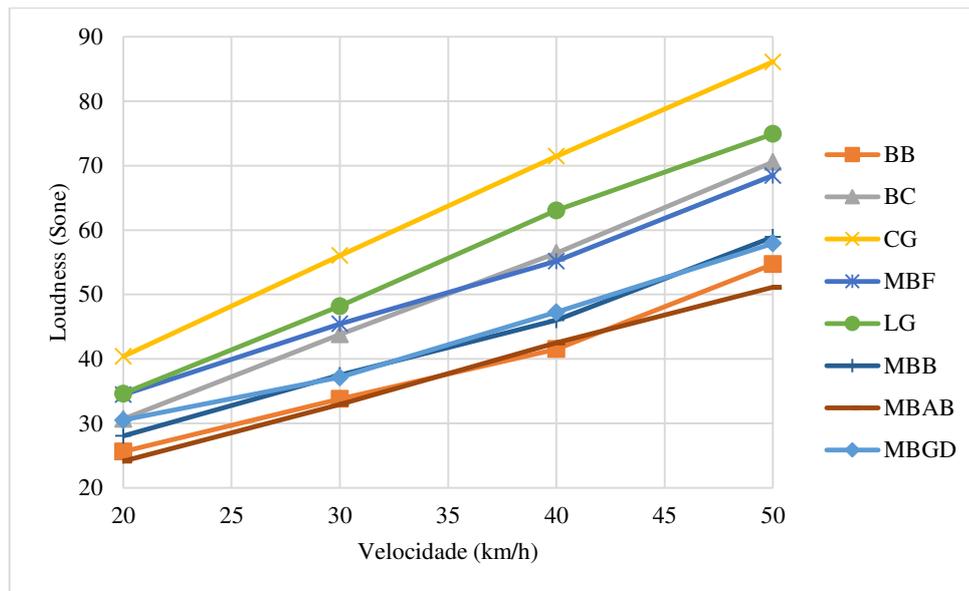


Figura 38 – Gráfico da variação do loudness com a velocidade para cada pavimento

Tal como acontece nos indicadores acústicos, o pavimento em cubos de granito apresenta os valores de loudness mais elevados, e os valores inferiores variam entre o betão betuminoso e a mistura betuminosa aberta com betume modificado com média percentagem borracha. Neste caso, verifica-se uma diferença entre o valor máximo (86,1 sone) e o valor mínimo (24,1 sone) de cerca de 62 sone, possibilitando uma maior distinção dos valores entre pavimentos e velocidades.

Neste caso, devido à maior distinção entre os resultados dos pavimentos, pode-se dizer que os resultados estão agrupados graficamente. Verifica-se a formação um grupo de superfícies de menor ruído (constituído pelo betão betuminoso, pelas duas misturas betuminosas abertas com betume modificado com borracha e pela mistura betuminosa de granulometria descontínua), um grupo de superfícies intermédias (formado pelos pavimentos em lajes de granito, em blocos de cimento e pelo microaglomerado betuminoso a frio), e a superfície dos cubos de granito distinguida como a mais ruidosa.

Em todos os indicadores, e para todas as superfícies de pavimento, verifica-se uma tendência crescente dos valores com a velocidade. Tal como se esperava, os pavimentos betuminosos apresentam os resultados mais reduzidos, sendo a superfície do microaglomerado betuminoso a frio a que gera maiores níveis de ruído pneu-pavimento, entre os mesmos. O pavimento em

cubos de granito é, claramente, o pavimento mais ruidoso, seguindo-se as lajes de granito e os blocos de cimento.

6.1.2. Relação entre os indicadores

Os indicadores acústicos L_{Aeq} e L_{Amax} são geralmente utilizados na caracterização do ruído rodoviário. No entanto, investigações recentes têm como objeto de estudo variáveis psicoacústicas, entre as quais o indicador loudness, que foi comprovado ser o melhor preditor do ruído rodoviário (Mendonça et al., 2013).

De modo a relacionar e comparar de forma eficiente a variação dos indicadores com a velocidade e entre pavimentos, todos os dados foram normalizados pelo método z-scores. Este método é calculado tendo em conta a média e o desvio padrão da distribuição, não. Desta forma é possível analisar o loudness, L_{Aeq} e L_{Amax} numa mesma escala (Figura 39).

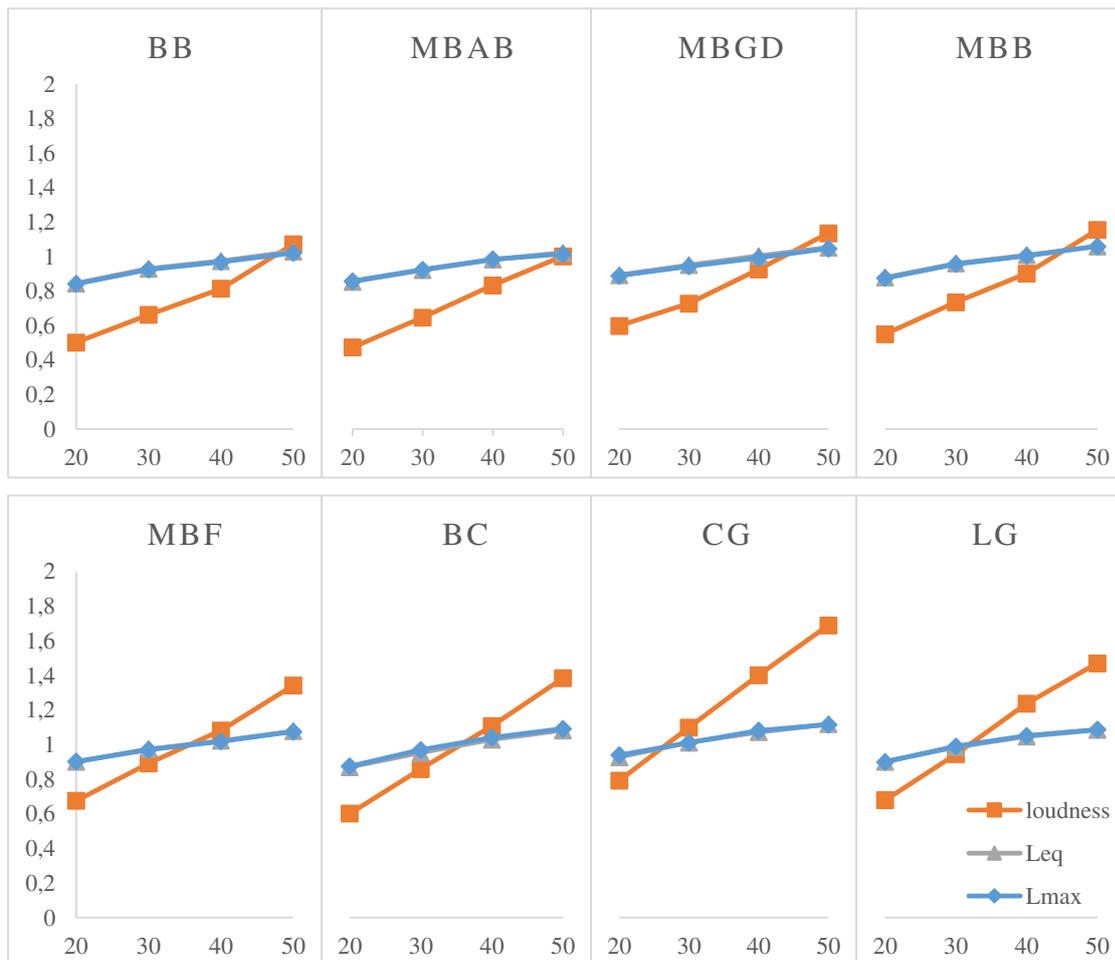


Figura 39 – Relação entre os indicadores numa escala normalizada

A proximidade dos resultados das variáveis L_{Aeq} e L_{Amax} resulta numa sobreposição das curvas na escala normalizada. Os valores dos níveis de pressão sonora originam uma variação de L_{Amax} e L_{Aeq} reduzida com a velocidade, logo retas de baixo declive, e um comportamento semelhante entre as curvas dos oito pavimentos em estudo. Ao analisar os pavimentos pelas curvas de L_{Amax} e L_{Aeq} , devido às suas semelhanças, é difícil fazer uma distinção entre pavimentos com base nos indicadores acústicos. Por sua vez, as curvas de loudness apresentam uma variação com a velocidade distinta entre pavimentos, e permitem perceber quais os pavimentos com um comportamento acústico semelhante.

A Figura 40 permite perceber melhor a semelhança das curvas de L_{max} e L_{eq} de todos os pavimentos, e a distinção entre as curvas do loudness. No caso dos resultados do loudness verifica-se a proximidade de algumas curvas, o que permite agrupar os pavimentos por comportamento acústico.

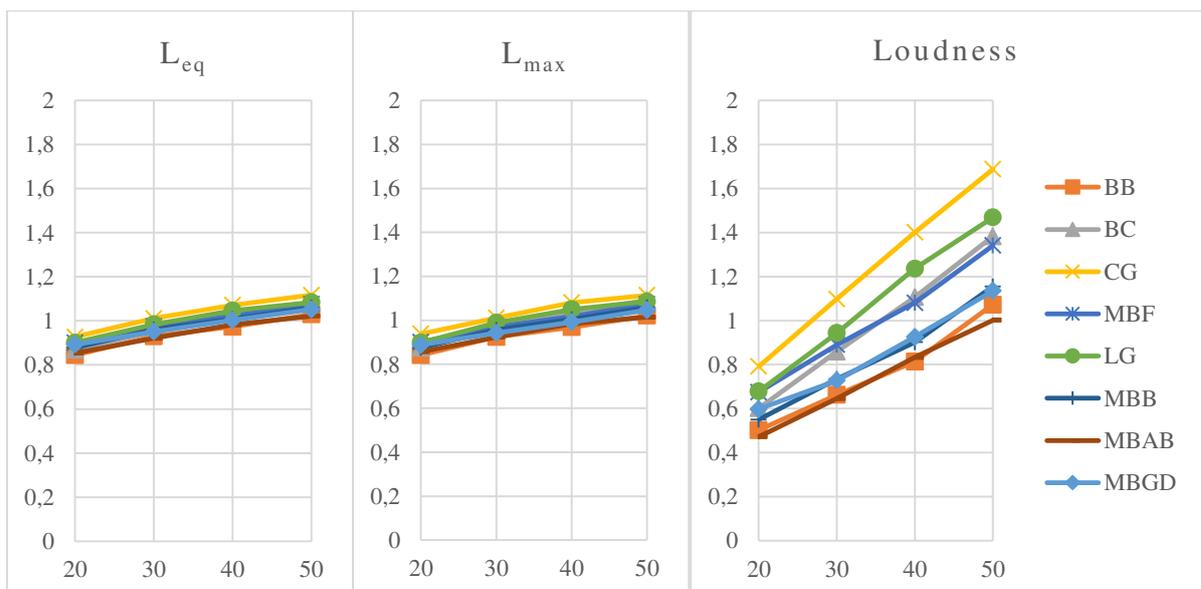


Figura 40 – Relação entre os pavimentos numa escala normalizada, para os diferentes indicadores

Analisando os resultados do loudness, entre os pavimentos mais ruidosos, verifica-se a proximidade do microaglomerado betuminoso a frio com as lajes de granito nas velocidades mais baixas, e com os blocos de cimento nas velocidades mais elevadas. Os cubos e as lajes de granito, sendo os pavimentos com níveis de ruído superiores, apresentam curvas com maior declive, havendo uma clara distinção dos cubos de granito com valores mais elevados em todas as velocidades.

Entre os pavimentos de menor ruído verificam-se semelhanças no comportamento acústico entre o betão betuminoso e a mistura betuminosa aberta com betume modificado com média percentagem de borracha, e entre a mistura betuminosa aberta com betume modificado com borracha e a mistura betuminosa com granulometria descontínua. Nestes casos, as retas partem de valores mais reduzidos, e têm uma menor variação com a velocidade.

Desta relação é possível apurar que, entre as três variáveis em análise, loudness é a que melhor caracteriza o comportamento acústico dos pavimentos.

6.2. Avaliação da intensidade do ruído pneu-pavimento

Das tarefas realizadas, e para cada um dos participantes, resultaram 5 respostas de avaliação da intensidade para cada uma das condições apresentadas. Tendo em conta que a reprodução dos estímulos foi feita de forma aleatória, os resultados foram organizadas por pavimento e velocidade, facilitando assim o cálculo das médias das 5 respostas e o respetivo desvio padrão. Para uma variação da escala de intensidade de 1 a 10, resultou uma resposta média máxima de 10 e mínima de 2,2, ambas dadas pelo sujeito 2.

Os resultados do cálculo da média e do desvio padrão das respostas dos dois participantes foram agrupados na Tabela 3 de forma a facilitar a sua leitura.

Tabela 3 – Médias e desvios padrão resultantes das tarefas de avaliação da intensidade

Pavimento	Velocidade (km/h)	Média respostas 1	D.P. 1	Média respostas 2	D.P. 2	Média Respostas total	D.P. total
BB	20	3,6	0,548	2,6	1,140	3,1	0,994
	30	3,4	0,894	3,4	1,517	3,4	1,174
	40	4,2	1,304	5,8	0,837	5	1,333
	50	6,2	0,837	7,8	0,837	7	1,155
BC	20	4,4	1,673	2,8	1,643	3,6	1,776
	30	5,8	0,837	6,8	1,643	6,3	1,338
	40	8,2	0,837	8,0	0,707	8,1	0,738
	50	8	0,707	9,0	0,707	8,5	0,850
CG	20	5,8	0,837	5,8	1,643	5,8	1,229
	30	7,6	0,548	8,6	0,548	8,1	0,738
	40	8,6	0,548	9,4	0,548	9	0,667
	50	9	1	10	0	9,5	0,850
MBF	20	3,6	1,140	4,2	0,837	3,9	0,994
	30	5,6	1,673	6,6	0,548	6,1	1,287
	40	6,4	1,673	7,2	0,447	6,8	1,229
	50	8	1,225	8,8	0,447	8,4	0,966
LG	20	4,6	0,894	4,6	1,517	4,6	1,174
	30	5,4	1,342	7,2	0,447	6,3	1,338
	40	7,6	0,548	8,6	0,548	8,1	0,738
	50	8,4	1,140	9,6	0,548	9	1,054
MBB	20	3	0,707	3,2	1,304	3,1	0,994
	30	3,8	0,447	5,2	1,095	4,5	1,080
	40	6	0,707	5,2	1,789	5,6	1,350
	50	6,4	1,517	7,6	1,140	7	1,414
MBAB	20	3,2	1,095	2,2	1,095	2,7	1,160
	30	3,2	0,837	4,4	1,817	3,8	1,476
	40	4,8	0,837	6,4	0,894	5,6	1,174
	50	6,6	0,548	7,2	0,447	6,9	0,568
MBGD	20	3,8	0,837	3	1,225	3,4	1,075
	30	4	0,707	4,4	1,140	4,2	0,919
	40	5,4	0,548	6,2	0,837	5,8	0,789
	50	7	1	7,8	0,447	7,4	0,843

A Figura 41 ilustra graficamente as respostas dos dois sujeitos. Isto permite perceber, de modo geral, de que forma dois indivíduos diferentes reagem aos estímulos sonoros, e fazer uma correlação com os indicadores acústicos e psicoacústicos calculados.

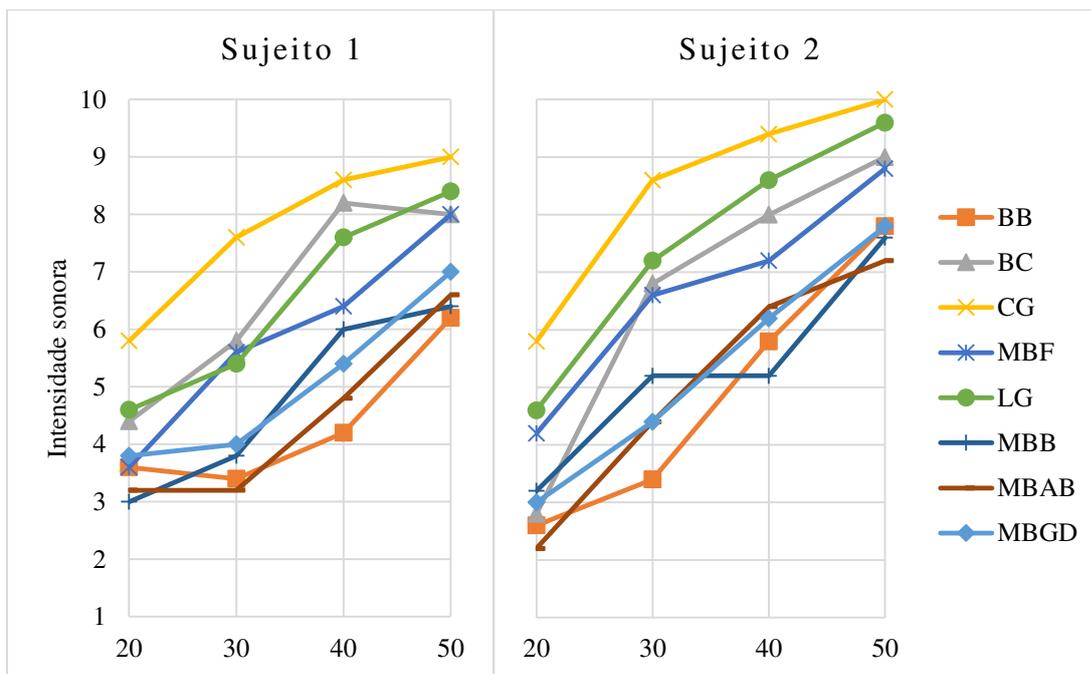


Figura 41 – Média das respostas dos sujeitos 1 e 2 para os oito pavimentos em função da velocidade

Tal como aconteceu com as variáveis calculadas, o pavimento em cubos de granito foi avaliado como o mais ruidoso para as quatro velocidades. No geral, os resultados das respostas são semelhantes, e ambos os sujeitos comprovam os diferentes comportamentos acústicos das superfícies já verificado nas análises anteriores.

Relativamente à variação da intensidade, as respostas do Sujeito 2 variam de 2,2 a 5,8 para a velocidade de 20 km/h, para 30 km/h variam de 3,4 a 8,6, para 40 km/h variam de 5,2 a 9,4, e para 50 km/h variam de 7,2 a 10. No caso do Sujeito 1, para a velocidade de 20 km/h as respostas variam de 3 a 5,8, para 30 km/h variam de 3,2 a 7,6, para 40 km/h variam de 4,2 a 8,6, e para 50 km/h variam de 6,2 a 9. Portanto, verifica-se que o Sujeito 2 usou respostas de intensidade mínimas inferiores, e máximas superiores às do Sujeito 1, apresentando por isso uma maior distribuição dos valores de intensidade, mostrando uma variação geral de 7,8.

6.2.1. Média das respostas

As Figuras 42 e 43 expõem os gráficos das médias das respostas de cada sujeito, organizadas por pavimento e velocidade.

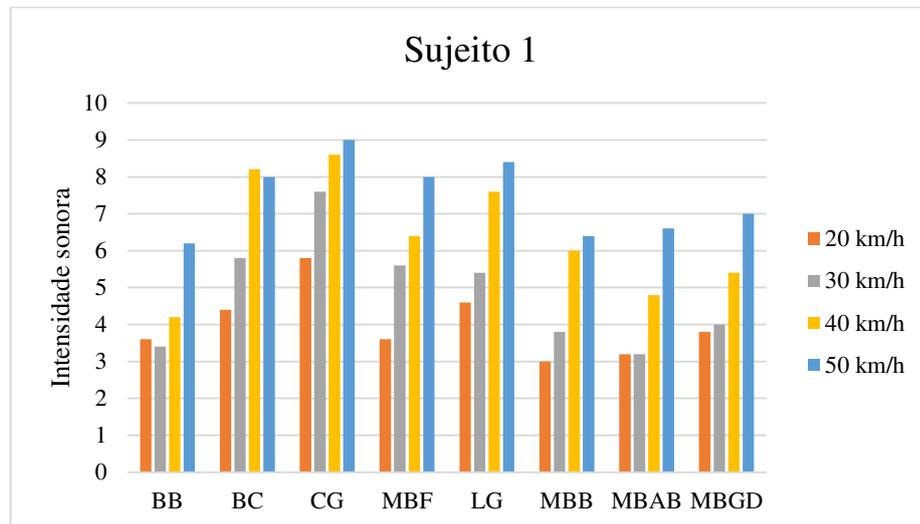


Figura 42 – Média das respostas do sujeito 1 para os oito pavimentos às quatro velocidades praticadas

No gráfico da Figura 42 verifica-se uma resposta de intensidade crescente do ruído para todos os pavimentos em função da velocidade, exceto para o betão betuminoso que decresce de 20 km/h para 30 km/h, e para os blocos de cimento que decresce de 40 km/h para 50 km/h. No entanto, esse decréscimo não é significativo. Estes pavimentos são os que apresentam, respetivamente, os menores e maiores níveis de loudness.

Segundo o Sujeito1, a condição mais ruidosa corresponde à circulação a 50 km/h num pavimento em cubos de granito (intensidade média de 9), seguindo-se o ruído em lajes de granito, também a 50 km/h (intensidade média de 8,4). Os estímulos com a avaliação de menor intensidade correspondem à circulação nas duas superfícies de mistura betuminosa aberta com betume modificado com borracha a 20 km/h, tendo a camada de média percentagem de borracha uma intensidade média de 3,2, e a outra uma intensidade média de 3.

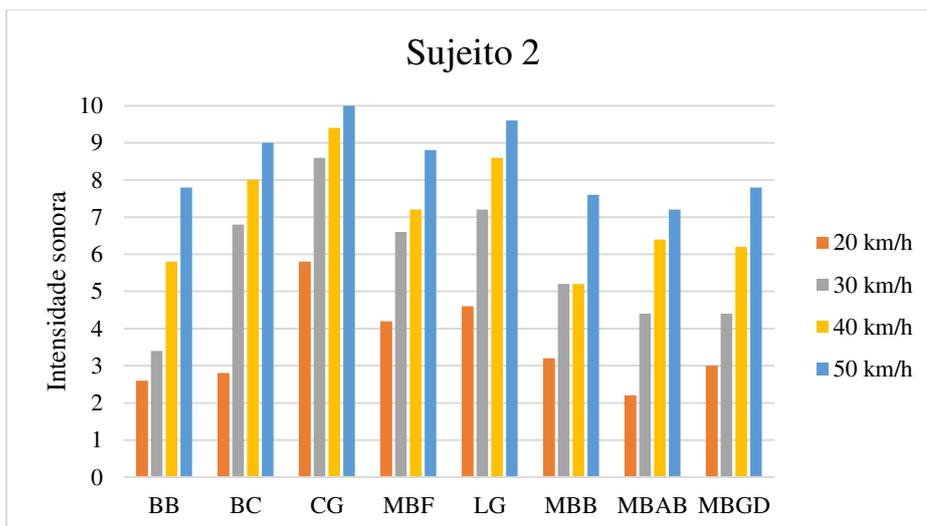


Figura 43 – Média das respostas do sujeito 2, para os oito pavimentos, às quatro velocidades praticadas

Da média das respostas do Sujeito 2 (Figura 43), assim como se esperava, resulta um gráfico de colunas crescente com o aumento da velocidade. Segundo esta avaliação, as condições mais ruidosas acontecem também a 50 km/h em cubos de granito (intensidade média de 10), e em lajes de granito (intensidade média de 9,6). Por sua vez, as médias de menor intensidade correspondem à circulação numa superfície de mistura betuminosa aberta com betume modificado com média percentagem de borracha, com intensidade média de 2,2, e numa superfície de betão betuminoso (intensidade média de 2,6), ambas a 20 km/h.

Na Figura 44 apresenta-se a média dos dois sujeitos.

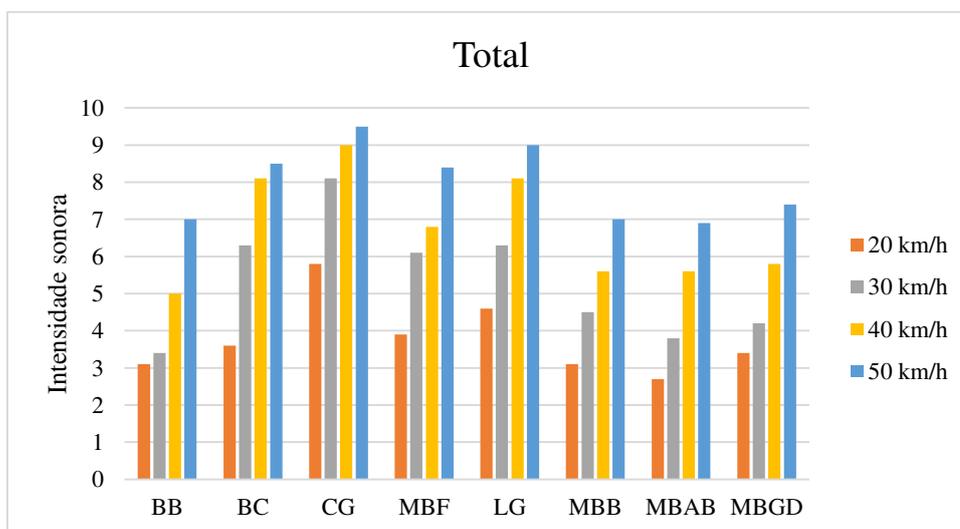


Figura 44 – Média das respostas dos dois sujeitos

Assim como acontece na média das respostas do Sujeito 2, para cada um dos pavimentos, resulta um gráfico de colunas crescente com o aumento da velocidade. Da média da totalidade das respostas resulta uma intensidade máxima de 9,5, correspondente ao ruído pneu-pavimento a 50 km/h em cubos de granito, seguindo-se o pavimento em lajes de granito com intensidade de 9. A menor intensidade pertence ao ruído pneu-pavimento numa superfície de mistura betuminosa aberta com betume modificado com média percentagem de borracha a 20 km/h (intensidade média de 2,2), seguindo-se o ruído a 20 km/h em superfície de betão betuminoso e de mistura betuminosa aberta com betume modificado com borracha, ambos com intensidade média de 3,1.

6.2.2. Desvio Padrão dos resultados

Neste tipo de estudo é importante verificar a dispersão dos resultados em relação à média, e para tal é calculado o desvio padrão. Um baixo desvio padrão indica que os dados tendem a estar próximos da média. Por sua vez, um desvio padrão elevado aponta para dispersão dos dados por uma gama de valores.

As Figuras 45, 46 e 47 apresentam os gráficos do desvio padrão da média das respostas dos dois indivíduos individualmente e no total.

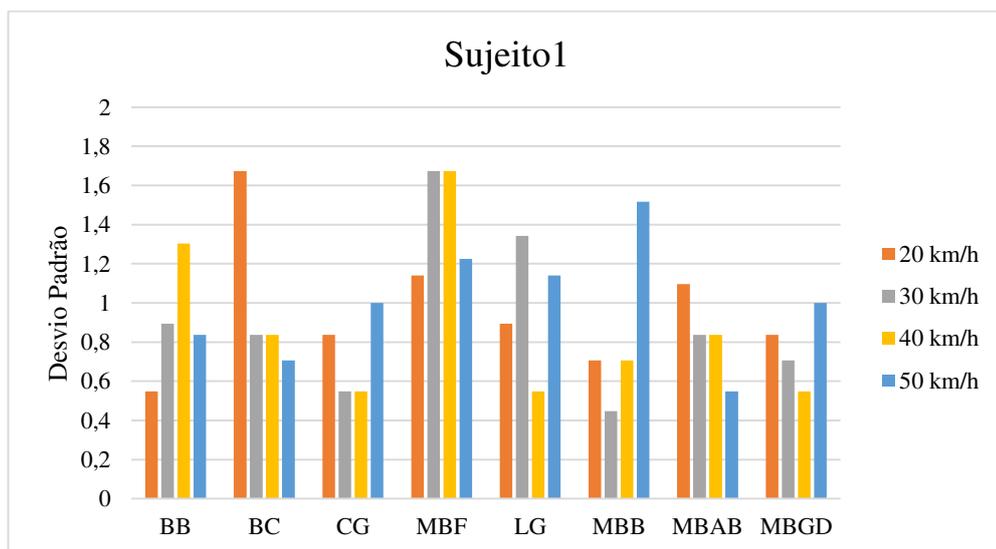


Figura 45 – Desvio Padrão obtido nas respostas do sujeito 1

As respostas do Sujeito 1 revelaram um maior desvio padrão no ruído pneu-pavimento a 20 km/h em blocos de cimento, a 30 km/h e 40 km/h em microaglomerado betuminoso a frio, e a 50 km/h em mistura betuminosa aberta com betume modificado com borracha. Conclui-se então que, neste caso, a dispersão de dados não tem relação com a velocidade ou o tipo de pavimento.

O desvio padrão resultante desta amostra varia entre 0,45 e 1,67. Como todos os valores são inferiores a 2 e a média do desvio padrão é inferior a 1, sendo aproximadamente igual a 0,94, estes resultados são considerados viáveis.

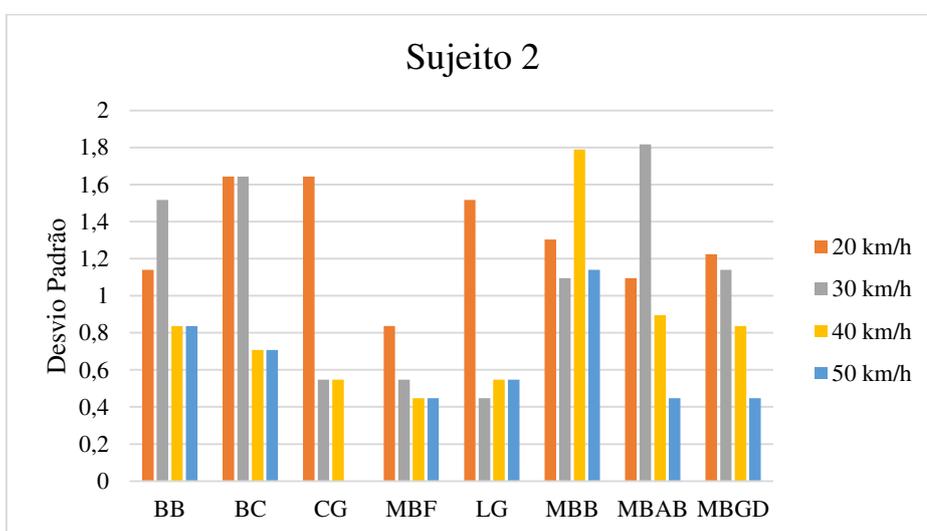


Figura 46 – Desvio Padrão obtido nas respostas do sujeito 2

No caso do Sujeito 2 (Figura 46), verifica-se uma tendência de maior dispersão para as velocidades mais baixas, principalmente a 20 km/h. No entanto, não parece existir qualquer relação dos valores do desvio padrão com a superfície do pavimento.

Para este sujeito, o desvio padrão das respostas compreende-se no intervalo de 0 a 1,82, e têm valor médio de 0,95. Assim, os resultados desta tarefa também viabilizam as respostas registadas.

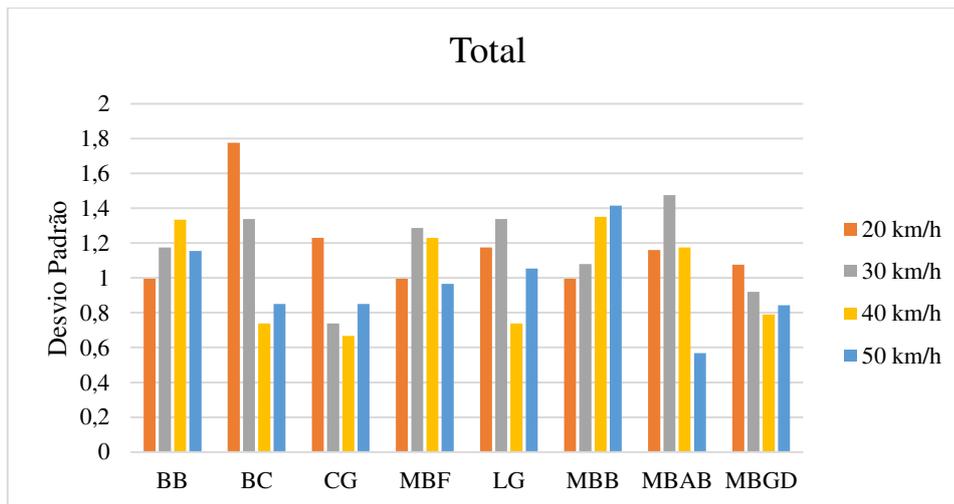


Figura 47 – Desvio Padrão das respostas dos dois sujeitos

O gráfico da Figura 47 apresenta a variação da totalidade das respostas, da qual resulta um desvio padrão médio de 1,08 e uma variação de 0,57 a 1,78. Estes valores são próximos dos obtidos nas tarefas individuais, logo também aceitáveis. Assim, os resultados das duas tarefas de avaliação da intensidade do ruído da interação pneu-pavimento permitem fazer uma correlação com os níveis de loudness e de pressão sonora calculados com alguma confiança.

6.3. Correlação dos modelos de loudness com as respostas de intensidade

Neste ponto pretende-se averiguar se o modelo de Chalupper e Fastl, o mais usual em estudos no âmbito do ruído rodoviário, é o que melhor prevê a avaliação da intensidade do ruído de tráfego rodoviário. Os valores resultantes dos vários modelos são apresentados em seguida, na Tabela 4.

Para uma análise mais completa são apresentados gráficos de dispersão de dados com a linha de tendência linear, com indicação do modelo apresentado, e o coeficiente de determinação (R^2). O R^2 é uma medida de ajustamento de um modelo estatístico linear generalizado em relação aos valores observados. Os seus valores variam entre 0 e 1, sendo que, quanto maior for R^2 , mais explicativo é o modelo e melhor se ajusta à amostra.

Tabela 4 – Resultados de loudness calculados pelos dois modelos em análise

Pavimento	Loudness CF (Sone)	Loudness MG (Sone)
BB	25,6	36,9
	33,8	48,4
	41,5	58,5
	54,7	75,5
BC	30,7	42,5
	43,8	59,7
	56,5	77,2
	70,6	95,1
CG	40,4	54,0
	56,1	73,8
	71,5	93,4
	86,1	112,1
MBF	34,4	45,9
	45,4	61,1
	55,2	74,0
	68,5	91,6
LG	34,6	47,0
	48,2	66,1
	63,1	85,3
	74,9	100,3
MBB	28,1	39,4
	37,5	52,8
	46,0	64,4
	58,9	81,4
MBAB	24,1	35,2
	33,0	46,7
	42,5	60,0
	51,1	71,7
MBGD	30,5	43,2
	37,1	52,4
	47,2	65,8
	57,9	80,0

Apesar dos valores de loudness de ambos os modelos serem expressos em sone, os resultados do modelo de Moore, Glasberg e Baer são claramente superiores aos do modelo de Chalupper e Fastl. Porém, isto não permite perceber qual o modelo que melhor prevê a avaliação da intensidade do ruído de tráfego rodoviário. Para tal são analisados os gráficos de dispersão de dados, e o respetivo modelo e coeficiente de determinação (R^2).

O gráfico da Figura 48 apresenta a relação entre o loudness calculado pelo modelo de Chalupper e Fastl e a intensidade do ruído.

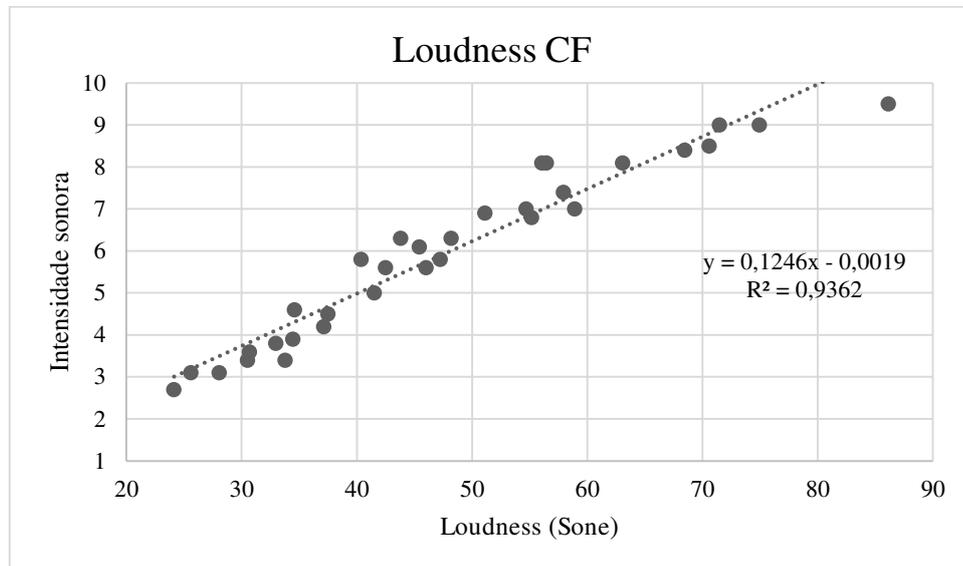


Figura 48 – Relação entre loudness e a avaliação da intensidade

O loudness deste modelo explica 93,62% da variação da intensidade avaliada pelos sujeitos relativamente ao ruído de tráfego. Este indicador mostra um bom ajuste à amostra, e um maior loudness significa maior intensidade do ruído gerado.

A Figura 49 apresenta os valores do loudness calculados pelo modelo de Moore, Glasberg e Baer dispersos no gráfico ao longo da reta de ajuste com a intensidade do ruído.

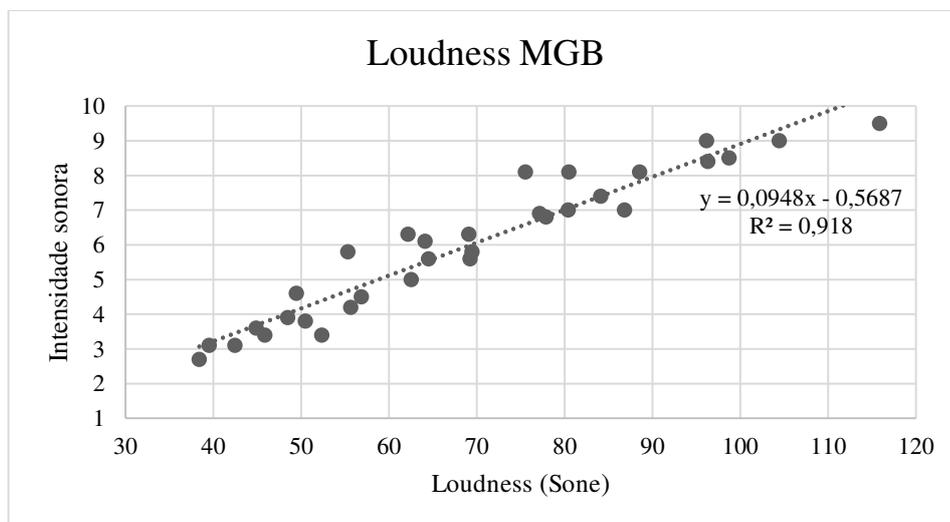


Figura 49 – Relação entre loudness (MGB) e a avaliação da intensidade

Neste caso o loudness explica 91,8% da variação da intensidade avaliada pelos sujeitos relativamente ao ruído de tráfego.

Ambos os modelos em análise possuem um coeficiente de determinação superior a 90%, logo um bom ajustamento em relação aos valores observados, contudo o modelo Loudness CF, nesta experiencia, revelou ser o mais explicativo e que melhor se ajusta à amostra.

6.4. Correlação das respostas de intensidade com L_{Amax} , e L_{eq}

Como a correlação das respostas com o loudness foi apresentada anteriormente, os gráficos que se seguem representam a relação entre os níveis de pressão sonora (L_{Amax} e L_{Aeq}) e os valores de intensidade obtidos com a média das respostas das tarefas de avaliação dos estímulos. Assim, entre todos os indicadores calculados, pretende-se verificar qual o que melhor se ajusta à amostra. O gráfico da Figura 50 apresenta a relação entre L_{Amax} e a intensidade do ruído.

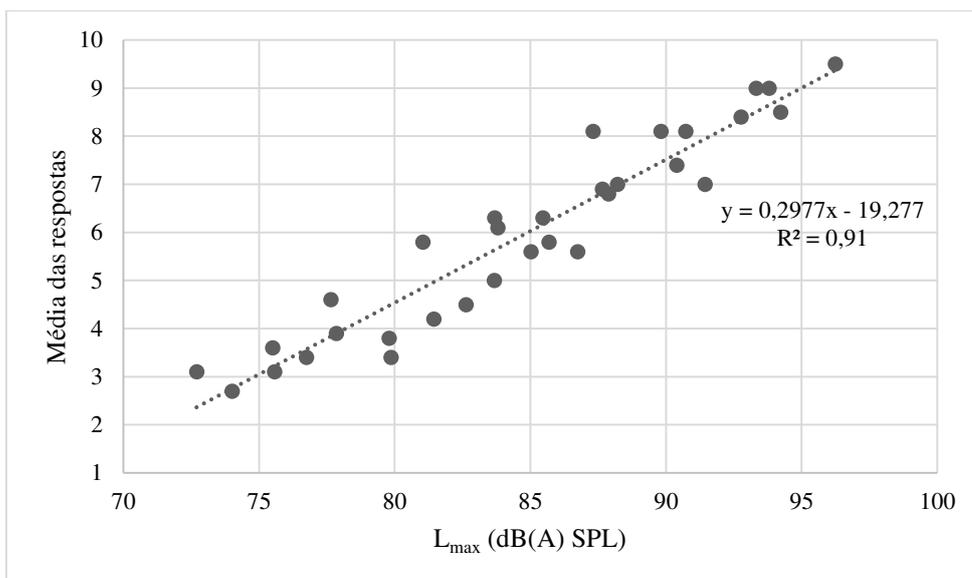


Figura 50 – Relação entre L_{Amax} e a avaliação da intensidade

O indicador L_{Amax} explica 91% da variação da intensidade avaliada pelos sujeitos relativamente ao ruído de tráfego. Um maior L_{Amax} significa maior intensidade do ruído gerado.

Apesar de mais de 90% dos valores de L_{Amax} conseguirem explicar a resposta, ainda existe alguma dispersão dos resultados. O gráfico da Figura 51 permite perceber de que forma os diferentes pavimentos se distribuem na relação entre o L_{Amax} e a avaliação da intensidade.

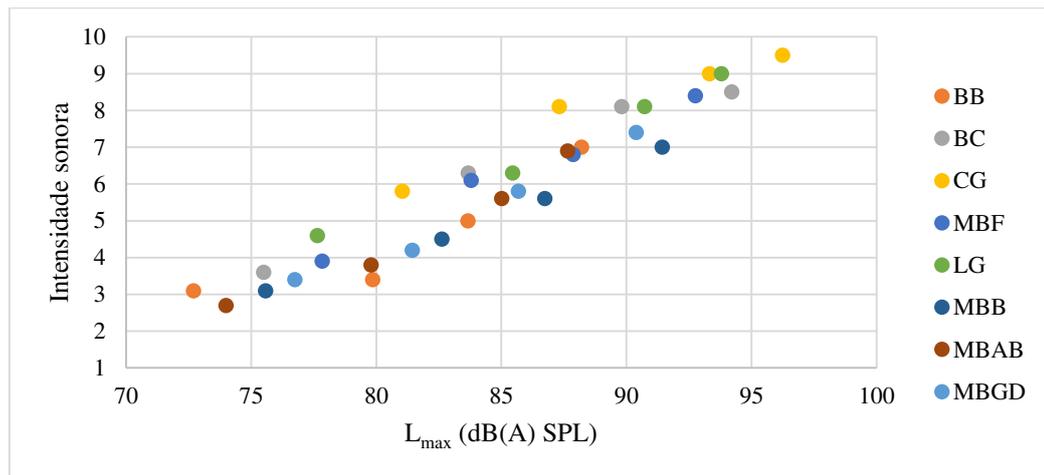


Figura 51 – Relação entre L_{Amax} e a avaliação da intensidade, com a distinção entre pavimentos

Cada cor corresponde a um material, assim é possível verificar quais os materiais que mais se aproximam e se agrupam por comportamento acústico. Assim, como se verifica no gráfico da Figura 52, com a ajuda das linhas de tendência traçadas, é possível agrupar os pavimentos em cubos de granito, em lajes de granito e em blocos de cimento como os materiais com comportamento acústico mais próximo. Os resultados de L_{Amax} destes pavimentos distinguem-se por valores superiores, sendo que os não é possível agrupar os restantes materiais.

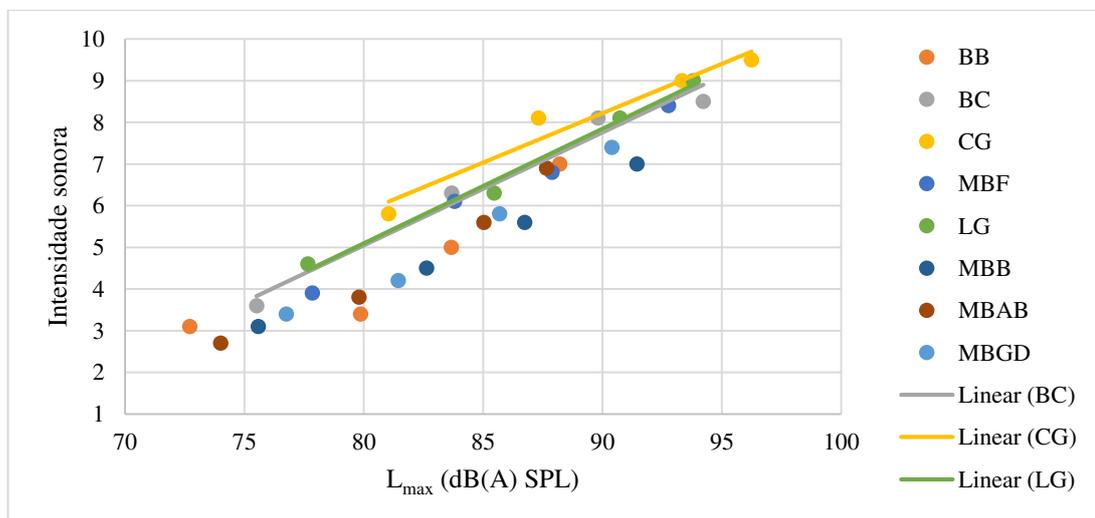


Figura 52 – Representação das linhas de tendência dos materiais que se agrupam

O gráfico da Figura 53 apresenta a relação entre L_{Aeq} e a intensidade do ruído.

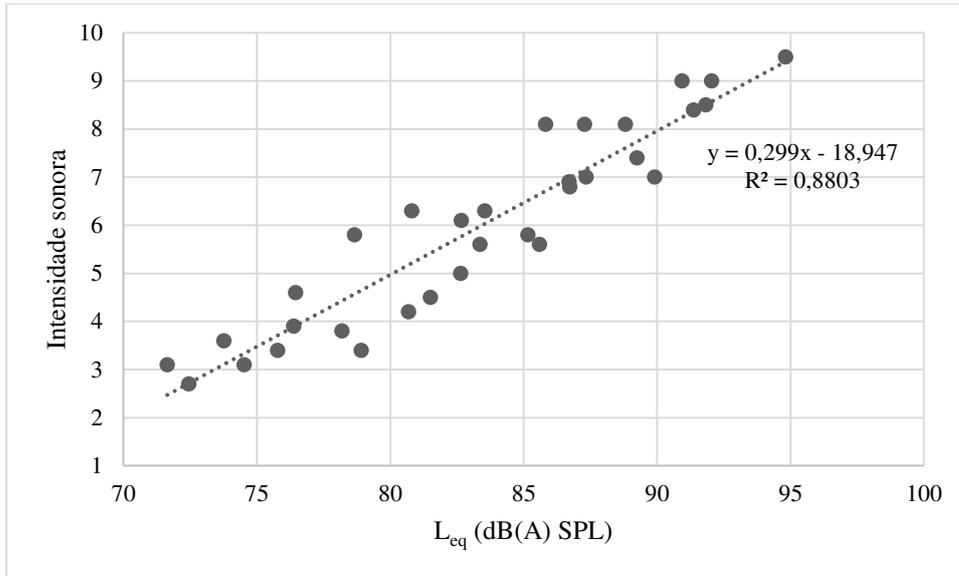


Figura 53 – Relação entre L_{Aeq} e a avaliação da intensidade

O L_{Aeq} explica 88% da variação da intensidade avaliada pelos sujeitos relativamente ao ruído de tráfego. Um maior L_{Aeq} significa maior intensidade do ruído gerado.

Neste caso, o ajuste à amostra ainda é menor do que no caso do L_{Amax}. O gráfico da Figura 54 permite perceber como os tipos de pavimento se distribuem pela amostra, possibilitando agrupá-los por comportamento acústico.

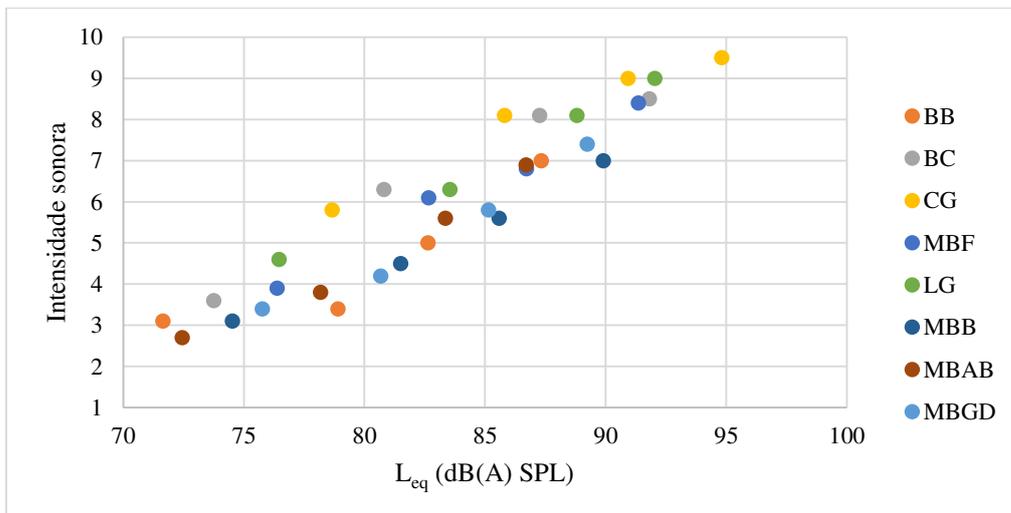


Figura 54 – Relação entre L_{Aeq} e a avaliação da intensidade, com a distinção entre pavimentos

Tal como acontece com o indicador acústico L_{max}, os pavimentos em cubos de granito, em lajes de granito e em blocos de cimento agrupam-se melhor que os restantes pavimentos. As linhas

de tendência traçadas no gráfico da Figura 55 permitem perceber de forma mais clara como os níveis de pressão sonora equivalente destes pavimentos se distinguem dos restantes.

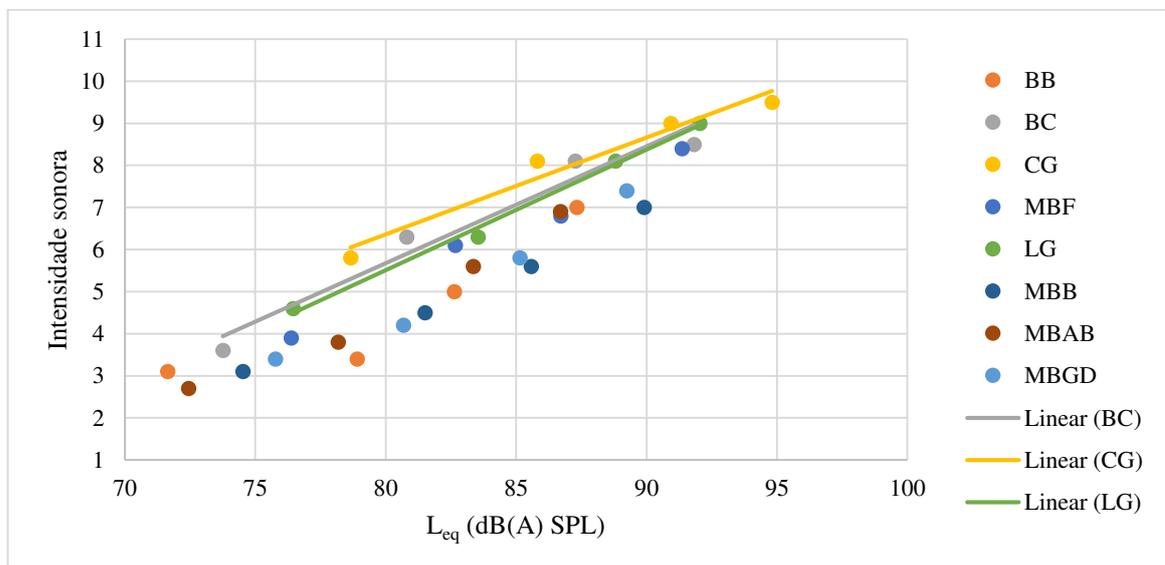


Figura 55 – Representação das linhas de tendência dos materiais que se agrupam

Das três variáveis, a que melhor prediz as respostas da avaliação da intensidade é o indicador psicoacústico loudness. Contudo, o nível de pressão sonora máximo do ruído apresenta um coeficiente de determinação próximo do obtido para o loudness, revelando-se ser melhor preditor que o nível de pressão sonora equivalente. Isto mostra a relevância dos “picos” dos espectros sonoros, isto é, a importância que os valores máximos do ruído têm nos ouvintes.

Tendo em conta que neste estudo foram apenas utilizadas as respostas de dois sujeitos, os resultados devem ser utilizados com devida cautela. Todavia, esta análise permite perceber de um modo geral a influência e a variação do ruído dos diferentes pavimentos, sendo um importante passo para o desenvolvimento de um estudo mais aprofundado.

7. CONCLUSÕES

7.1. Conclusões gerais

O ruído de um ambiente rodoviário resulta da combinação dos sons gerados pelos diversos veículos que circulam nas vias. Os fatores que influenciam o ruído estão interrelacionados e exercem impactes, quer sobre os níveis gerais de ruído, quer sobre os componentes da frequência do ruído. Estes fatores 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. O ruído de interação pneu-pavimento 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 e pressão do pneu.

Entre os mecanismos de geração do ruído pneu-pavimento, destacam-se os mecanismos de origem mecânica e os de origem aerodinâmica. Os de origem mecânica incluem as vibrações radiais, tangenciais e da parede lateral do pneu, assim como as vibrações stick-snap e stick-slip. Por sua vez, os mecanismos de geração aerodinâmica mais influentes são o bombeamento do ar e a ressonância na cavidade interna do pneu. Assim, poder-se-á dizer que os níveis de ruído totais junto ao pneu são essencialmente em função da textura da superfície do pavimento e do tipo de pneu.

São vários os parâmetros acústicos que permitem quantificar os ruídos, desde indicadores calculados com base nos níveis de pressão sonora, a indicadores psicoacústicos que dependem não só das propriedades físicas do ruído mas também das características físicas e psicológicas dos indivíduos. Neste caso os parâmetros acústicos selecionados para o estudo foram os indicadores mais utilizados no âmbito do ruído rodoviário, isto é, os níveis de pressão sonora máximo e equivalente (L_{max} e L_{eq}), e o indicador psicoacústico loudness.

Neste estudo foram selecionados oito trechos experimentais com pavimentos em betão betuminoso, mistura betuminosa aberta com betume modificado com borracha, mistura betuminosa aberta com betume modificado com média percentagem de borracha, mistura betuminosa de granulometria descontínua, microaglomerado betuminoso a frio, cubos de granito, lajes de granito, e em blocos de cimento. Em cada um dos pavimentos foram efetuadas

aquisições do ruído de contacto pneu-pavimento recorrendo ao método da proximidade imediata (CPX).

A tarefa de avaliação da intensidade do ruído pneu-pavimento teve como objetivo estabelecer correlações entre os indicadores de ruído e as respostas de ouvintes aos estímulos, e assim determinar a relação que melhor representa o efeito do ruído rodoviário nos indivíduos. Os resultados revelaram um melhor ajuste com a amostra de loudness, sendo que, entre os níveis de pressão sonora máximos e equivalentes, L_{Amax} foi o que obteve resultados mais próximos.

Esta tarefa permitiu ainda demonstrar que, entre os modelos de loudness do software PsySound3 testados, o modelo de Chalupper e Fastl foi o que melhor se ajustou à amostra. Contudo, o modelo de Moore, Glasberg e Baer também apresenta bom ajuste à amostra, logo reúne condições para caracterizar o ruído do tráfego rodoviário.

Assim como se previa, este trabalho revelou que os pavimentos betuminosos são os que apresentam menores níveis de ruído, particularmente as superfícies de betão betuminoso e de mistura betuminosa aberta com betume modificado com média percentagem de borracha, sendo a superfície mais ruidosa a de microaglomerado betuminoso a frio. Dos três mais ruidosos o pavimento em cubos de granito é o que mais se destaca, obtendo níveis de pressão sonora e de loudness superiores a todas as velocidades.

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. Para uma variação de 20 km/h para 50 km/h e no pavimento em blocos de granito, o nível de pressão sonora máximo aumenta em cerca de 18 dB(A) e o loudness sofreu um acréscimo de 46 sone.

Este trabalho é um estudo exploratório que usa uma técnica mais avançada de aquisição de ruído pneu-pavimento, com maiores potencialidades de utilização e que se verifica ser adequado à sua utilização na caracterização da incomodidade em diferentes ambientes. Em trabalhos futuros pretende-se desenvolver esta técnica.

7.2. 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 numa pequena amostra de sujeitos, este pode ser considerado o ponto de partida para um estudo mais aprofundado, uma vez que os resultados revelam a possibilidade de realizar outro tipo de tarefas de avaliação e com uma maior amostra de sujeitos.

Assim, utilizando os ruídos da interação pneu-pavimento adquiridos pelo método CPX neste trabalho, propõe-se:

- A simulação de ambientes rodoviários reais através da criação de ambientes virtuais. Os ambientes virtuais resultam de estímulos sonoros, criados a partir dum algoritmo que simula a passagem de um veículo, à velocidade pretendida, num espaço com superfícies refletoras ou em free field.
- Avaliação do incómodo gerado pelo ruído dos diferentes tipos de pavimento e condições de circulação dos veículos, simuladas nesses ambientes virtuais;
- Avaliação dos níveis de deteção de diferentes indivíduos em função da idade, tipo de pavimento e condições de circulação a partir dos sons obtidos nos ambientes virtuais.

Propõe-se ainda a integração de outras superfícies de pavimentos rodoviários e integração de velocidades mais elevadas no estudo, para se determinar os níveis de incomodidade em ambientes urbanos junto a estradas de elevada velocidade de circulação, como autoestradas e vias rápidas, onde são utilizados pavimentos porosos e em betão de cimento.

Esta técnica avançada de aquisição de ruído pneu-pavimento e a análise dos espectros de frequência dos ruídos medidos em contínuo permitirá evoluir para a utilização do indicador psicoacústico loudness para avaliar a incomodidade a nível da rede, criando deste modo mapas de ruído mais criteriosos e inovadores. Possibilita ainda a monitorização do comportamento acústico e a avaliação da durabilidade acústica dos pavimentos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida, J.C.G.R. (1986). Análise Estrutural de Pavimentos Rígidos pelo Método dos Elementos Finitos, IST, Lisboa.
- Andrea, A., Mascio, P., Domenichini, L., Ranzo, A. (1999). TINO Prototype of a Low Noise Asphalt, 1º International Colloquium on Vehicle Tyre Road Interaction, Rome.
- Antunes, M.L., Coutinho, A.S., Patrício, J., Freitas, E., Paulo, J., Coelho, J.B., Cardoso, F.T. (2008). Avaliação do ruído de tráfego: metodologia para a caracterização de camadas de desgaste aplicadas em Portugal.
- Antunes, S. (2011). Avaliação do Ambiente sonoro em zonas urbanas. Integração de aspectos qualitativos, Universidade de Aveiro, Aveiro.
- Barton, B.K., Ulrich, T.A., Lew, R. (2012). Auditory detection and localization of approaching vehicles, *Accid Anal Prev*, Vol. 49, pp. 347-53.
- Bendtsen, H. (2008). Urban Transport Noise Abatement Challenges for the Future The Road Surface Component, *Silence*.
- Bendtsen, H., Andersen, B. (2005). Noise-Reducing Pavements for Highways and Urban Roads – State of the Art in Denmark.
- Blokland, G.J.v., Leeuwen, H.M.v., Schwanen, W. (2006). IPG 1.4 Robust CPX - Comparison of Potential CPX Tyres - Selection of Test Tyres, Vught, the Netherlands: M+P Raadgevende Ingenieurs bv.
- Bragança, L., Freitas, E.F., Pinheiro, D.d.S. (2006). Eficácia de barreiras acústicas, *Tecniacústica 2006: 37º Congreso Nacional de Acústica*, Gandia, Valência, España.
- Cabrera, D., Ferguson, S., Rizwi, F., Schubert, E. (2008). PsySound3: A Program for the Analysis of Sound Recordings, *Acoustics'08*, Paris.
- Cabrera, D., Ferguson, S., Schubert, E. (2007). PsySound3: Software for acoustical and psychoacoustical analysis of sound recordings, *13th International Conference on Auditory Display*, Montréal, Canada.
- Carvalho, A.P.O., Rocha, C. (2008). Manual Técnico para Elaboração de Planos Municipais de Redução de Ruído.

- CE (1996). Futura política de ruído, Livro verde da Comissão Europeia, Comissão das Comunidades Europeias, Bruxelas.
- CE (2009). Regulamento (CE) n.º 1222/2009, de 25 de Novembro de 2009. Rotulagem dos pneus no que respeita à eficiência energética e a outros parâmetros essenciais, Parlamento Europeu.
- DL (2007). Decreto-Lei n.º 9/2007, de 14 de Janeiro. Regulamento Geral de Ruído, Diário da República - 1ª série, p. 389-398, A. Portugal.
- Domenichi, L., Fracassa, A., La Torre, F., Loprencipe, G., Ranzo, A., Scalamandre, A. (1999). Relationship between Road Surface Characteristics and Noise Emission, 1º International Colloquium on Vehicle Tyre Road Interaction “The Noise Emission”, Roma, Italy.
- EC (2012). ‘QCITY’ and ‘SILENCE’ – EU projects target urban noise; http://ec.europa.eu/research/transport/projects/items/_qcity__and__silence____eu_projects_target_urban_noise_en.htm; Acedido em 18/02/2013.
- Fletcher, H., Munson, W.A. (1933). Loudness, its definition, measurement and calculation, The Bell System Technical Journal.
- Fonseca, R., Inácio, O., Freitas, E.F., Bragança, L. (2008). Determinação do desempenho acústico de dispositivos de redução de ruído do tráfego rodoviário, Acústica 2008, Coimbra, Portugal.
- Freitas, E.F. (2008). Contribuição da superfície dos pavimentos para a produção de ruído, Universidade do Minho Departamento de Engenharia Civil (5), pp. 21-32.
- Freitas, E.F., Machado, P.C., Freitas, C.P. (2012a). Avaliação e modelação do ruído de contacto pneu-pavimento, VIII Congresso Ibero-americano de Acústica, Évora - Portugal, pp. 1-10.
- Freitas, E.F., Mendonça, C., Santos, J.A., Murteira, C., Ferreira, J.P. (2012b). Traffic noise abatement: How different pavements, vehicle speeds and traffic densities affect annoyance levels, Elsevier.
- Freitas, E.F., Paulo, J., Coelho, J.L.B. (2008a). Avaliação do desempenho acústico de pavimentos rodoviários, Acústica 2008, Coimbra, Portugal, pp. 11.
- Freitas, E.F., Paulo, J., Coelho, J.L.B. (2008b). A redução no ruído rodoviário com a utilização de pavimentos de baixo ruído, Acústica 2008, Coimbra, Portugal, pp. 12.

- Freitas, E.F., Pereira, P.A.A., Paulo, J., Coelho, J.L.B. (2009). Avaliação do ruído de tráfego rodoviário em pavimentos com camadas de desgaste delgadas.
- Freitas, E.F., Pereira, P.A.A., Santos, L.P., Santos, A.P.S. (2006). A influência da água no ruído produzido pelo tráfego rodoviário, Universidade do Minho. Departamento de Engenharia Civil, p. 5-15.
- Freitas, E.F., Santos, A.P.S., Santos, L.P. (2008c). Estudo do efeito do tipo de pneu na geração de ruído rodoviário.
- Hanson, D., Donovan, P., James, R. (2005). Tire/Pavement Noise Characteristics of HMA Pavements, Symposium.
- Harris, C. (1979). Handbook of Noise Control, McGraw-Hill.
- IA (2004). Instituto do ambiente. O ruído e a cidade, traduzido e adaptado de: *Le Bruit et la Ville (1978) Ministère de l'Équipement et de l'Aménagement du Territoire Paris*.
- Inácio, O., Freitas, E.F., Raimundo, I., Fonseca, R. (2012). Avaliação do desempenho acústico de dispositivos de redução do ruído de tráfego, Sobrac 2012, Belém, Brasil.
- ISO11819-1, N. (1997). Acoustics – Method for Measuring the Influence of Road Surfaces on Traffic Noise – Part 1: Statistical Pass-By Method, International Organisation for Standardisation (ISO), Geneve, Switzerland.
- ISO/DIS11819-2, N. (2012). Acoustics – Method for Measuring the Influence of Road Surfaces on traffic noise – Part 2: The Close Proximity Method, International Organisation for Standardisation (ISO), Geneve, Switzerland.
- Kloth, M., Vancluysen, K., Clement, F., Ellebjerg, P.L., DRI (2008). Local noise action plans, Recommendation from the Silence project.
- Licitra, G., Cerchiai, M., Teti, L., Alfinito, L. (2009). Road pavement description by psycho-acoustical parameters from CPX data, Inter-noise 2009, Ottawa, Canada.
- Loon, R.v. (2008). Stille wegdekken in kaart gebracht met de CPX-methode, raadgevende ingenieurs, Vught; <http://www.geluidnieuws.nl/2008/thema/vanloon.html>; Acedido em 02/05/2013.
- McDade, A., Cardoso, C., Freitas, E.F., Inácio, O. (2012). Impacto das camadas superficiais dos pavimentos nos mapas de ruído - Casos de estudo, VIII Congresso Ibero-americano de Acústica, Évora, Portugal.

- Mendes, J.F.G., Silva, L.T. (2006). Indicadores de alteração global do clima acústico, uma metodologia de análise para monitorização do ruído urbano, PLURIS 2006 : anais do 2º Congresso Luso-Brasileiro de Planeamento Urbano Regional Integrado Sustentável, Braga, Portugal.
- Mendonça, C. (2012). Noise perception, psychoacoustic indicators, and traffic noise, *Gestão da velocidade e do ruído rodoviário*, Guimarães.
- Mendonça, C., Freitas, E., Ferreira, J.P., Raimundo, I.D., Santos, J.A. (2013). Noise abatement and traffic safety: The trade-off of quieter engines and pavements on vehicle detection, *Accid Anal Prev*, Vol. 51, pp. 11-7.
- Morgan, P., Sandberg, U., Blokland, G. (2009). The selection of new reference test tyres for use with the CPX method, to be specified in ISO/TS 11819-3, *Inter-noise 2009*, Ottawa, Canada.
- Nadkarni, I.T., Chatain, B. (2013). Veículos mais silenciosos nas estradas europeias, Parlamento Europeu; <http://www.europarl.europa.eu/news/pt/newsroom/content/20130201IPR05572/html/Ve%C3%ADculos-mais-silenciosos-nas-estradas-europeias>; Acedido em 18/02/2013.
- Olson, H.F. (1972). The Measurement of Loudness, *Audio - our 25th year*, pp. 18-22.
- Orfield, S.J. (1992). A new paradigm in psychoacoustic, part five: Sound quality metrics, *Sound & Communications*.
- Osses, A.V., Espinoza, V.C., Ángel, H.T. (2010). Psychoacoustic Audio Analysis in Frequency Domain, 2º PanAmerican/Iberian Meeting on Acoustics, Cancun, Mexico.
- Ostergaard, P.B. (2003). Physics of Sound and Vibration, *The Noise Manual* p. 19-39, American Industrial Hygiene Association.
- Paunović, K., Jakovljević, B., Belojević, G. (2009). Predictors of noise annoyance in noisy and quiet urban streets, *Science of the Total Environment*, Vol. 407.
- Pereira, P., Picado-Santos, L. (2002). *Pavimentos Rodoviários*, Braga.
- Pucher, E., Litzka, J., Haberl, J., Girard, J., Ejsmont, J., Lelong, J., Hamet, J.-F., Sandberg, U., Bendtsen, H., Watts, G., Parry, A., Blokland, G., Kuijpers, A. (2006). Recommendations on Specifications for Tyre and Vehicle Requirements, *Silvia Project Deliverable*.

- QCity (2008). What is QCity?, Quiet City Transport; <http://www.qcity.org/>; Acedido em 27/02/2013.
- Raggam, R.B., Cik, M., Holdrich, R.R., Fallast, K., Gallasch, E., Fend, M., Lackner, A., Marth, E. (2006). Personal noise ranking of road traffic: Subjective estimation versus physiological parameters under laboratory conditions, Science Direct.
- Sandberg, U. (2012). Adding noise to quiet electric and hybrid vehicles: An electric issue, Noise/News International, Vol. 20 (16), pp. 51-67.
- Sandberg, U., Ejsmont, J.A. (2002). Tyre/Road Noise Reference Book, Informex, SE-59040, Kisa, Sweden.
- Santos, A.P.S., Freitas, E.F., Santos, L.P. (2006). Estudo da eficácia dos pavimentos drenantes na redução do ruído rodoviário para as condições seco e molhado, Congresso Rodoviário Português: estrada 2006, Estoril, Portugal.
- Schlittenlacher, J., Fastl, H., Hashimoto, T., Kuwano, S., Namba, S. (2012). Differences of loudness algorithms across the frequency spectrum, Tagungsband Fortschritte der Akustik – DAGA 2012, Darmstadt.
- Schwanen, W., Blokland, G.J.v., Leeuwen, H.M.v. (2007). IPG 1.4 Robust CPX – Comparison of potential CPX-tyres – Variability within AVON AV4 and SRTT tyre type, Vught, the Netherlands: M+P Raadgevende Ingenieurs bv.
- Schwanen, W., Blokland, G.J.v., Leeuwen, H.M.v. (2008). IPG 1.4 Robust CPX – Comparison of potential CPX tyres – Comparison of CPX- and SPB-measurements, Vught, the Netherlands: M+P Raadgevende Ingenieurs bv.
- Scliar, M. (2007). História do conceito de saúde, Physis: Revista de Saúde Coletiva, p. 29-41, Rio de Janeiro.
- Silva, L.T. (2012). Qualidade do Ambiente Construído, Documento de apoio, Universidade do Minho.
- Wayson, R.L. (1998). Synthesis of Highway Practice 268, Relationship Between Pavement Surface Texture and Highway Traffic Noise, National Academy Press, Washington, D.C.
- WHO (2011). Burden of disease from environmental noise, Quantification of healthy life years lost in Europe; http://www.who.int/quantifying_ehimpacts/publications/e94888/en/; Acedido em 19/02/2013.