

Francisco Pedro Portela Graça

ESTRATÉGIAS PARA CIDADES MAIS VERDES E SILENCIOSAS

STRATEGIES FOR GREENER AND QUIETER CITIES

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, na área de Especialização em Construções,
orientada pelo Professor Doutor Andreia Sofia Carvalho Pereira e pelo Professor Doutor Luís Manuel Cortesão Godinho.

Coimbra, Fevereiro de 2017



UNIVERSIDADE DE COIMBRA



FCTUC DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

Francisco Pedro Portela Graça

ESTRATÉGIAS PARA CIDADES MAIS VERDES E SILENCIOSAS

STRATEGIES FOR GREENER AND QUIETER CITIES

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, na área de Especialização em Construções,
orientada pelo Professor Doutor Andreia Sofia Carvalho Pereira e pelo Professor Doutor Luís Manuel Cortesão Godinho.

Esta Dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor.
O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC declina qualquer
responsabilidade, legal ou outra, em relação a erros ou omissões
que possa conter.

Coimbra, 22 de fevereiro de 2017

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, quero agradecer a um Amigo que esteve sempre comigo e o qual me concedeu ferramentas para superar os obstáculos. Apesar dos nossos pontuais desentendimentos, quero que saibas, meu Deus, que Te quero continuar a ter comigo.

Quero agradecer aos meus pais, Fernando e Cristina, que me concederam a oportunidade de estudar, confiando nas minhas capacidades. A eles quero dizer: conseguimos!

Agradecer de uma forma especial a uma pessoa que para mim é uma referência. Uma pessoa de armas, corajosa, com uma força notável e que se desdobra em mil partes para que nada nos falte. Falo da minha mãe: Cristina Manuela das Neves Portela. Mulher, que apesar de levar o mundo às costas, de pouco se queixa, e na sua simplicidade, tem sempre um sorriso para oferecer.

Quero aproveitar também para deixar uma palavra de muito apreço aos meus avós, Francisco e Júlia, em especial à minha avó, que por obra das circunstâncias, nunca deixou de educar. Tal como a filha, é também uma Mulher com M grande.

Uma palavra de agradecimento aos meus “manos”, Filipe, Rui e Rodrigo, com os quais partilhei e partilho momentos de irmandade e pura cumplicidade. Eles deixam-me orgulhoso.

De uma forma especial, agradecer, aquela que de perto me tem acompanhado: à minha namorada, Eliana, companheira de jornada, uma rapariga com uma personalidade e garra invejáveis, que me deixa orgulhoso a cada dia que passa.

Aos amigos da Cáritas Jovem, que nos nossos momentos de amizade, me fizeram passar momentos de fraternidade e cumplicidade.

Aos amigos da Tertúlia PdC, os amigos do curso, com os quais partilhei momentos de fraternidade e de pura masculinidade. Que possamos crescer na nossa atividade profissional, olhando sempre uns pelos outros, tal como fizemos até agora.

Por fim, mas não menos importante, ao Justiça e Paz de Coimbra, uma casa que muito bem me acolheu e me pôs no caminho vários amigos que levo comigo no pensamento.

RESUMO

Mais de metade dos residentes em grandes cidades da Europa vive em zonas em que, principalmente o ruído rodoviário e ferroviário, afetam de forma adversa a saúde humana e bem-estar, causando problemas de sono, de concentração, ou pior, problemas cardiovasculares que contribuem para o aumento de mortes prematuras. Além da saúde dos habitantes, muitos espaços públicos, como parques, esplanadas e zonas verdes, são também afetados pelo ruído, reduzindo o potencial destas áreas. A implementação de estratégias de mitigação do ruído nas zonas urbanas, trará benefícios na saúde pública e consequentemente ganhos económicos.

Neste trabalho apresenta-se uma perspetiva geral do ruído nas cidades Europeias, dando a conhecer as principais fontes, associadas à circulação de veículos e aos mecanismos de geração de ruído que daí se desenvolvem, estando maioritariamente relacionados com a interação entre o veículo e o pavimento.

Faz-se uma exposição sumária de regulamentos europeus e nacionais que condicionam a produção de níveis sonoros excessivos e dá-se uma visão geral sobre os problemas associados à exposição excessiva ao ruído.

É objetivo principal, realizar uma compilação de estratégias que visam reduzir o ruído através do recurso a soluções ecológicas e inovadoras. Algumas correspondem a sistemas puramente ecológicos, que apenas recorrem a sistemas vegetativos ou que se fazem valer da configuração do local para otimizar a mitigação do ruído. Por outro lado, existem sistemas ou mesmo estratégias inovadoras, que se podem aplicar no âmbito do ruído rodoviário e ferroviário, que visam modificar ou acrescentar componentes aos elementos existentes causadores de ruído.

Palavras-chave: Panorama europeu, ruído rodoviário, ruído ferroviário, mitigação, soluções sustentáveis.

Este trabalho enquadra-se no projeto “METASHIELD”, financiado pela FCT – Fundação para a Ciência e Tecnologia e pelo COMPETE, com referência PTDC/ECM-COM/1364/2014.

ABSTRACT

More than a half of residents in big European cities live in areas where mainly road and railways noise affects human health and wellness causing sleep disturbance, lack of concentration, or worst, cardiovascular diseases which contributes for the raise of premature deaths. Besides the health of the habitants, many public spaces, like parks, terraces and green zones are affected by these noise sources, reducing the value of these areas. The implementation of mitigation noise strategies in urban areas will improve public health and, consequently, bring economic gains.

In this work it is pretended to present an overview of the noise that affects the European cities, describe the main sources, associated to vehicle circulation and its noise generation mechanisms, mostly related to vehicle-pavement interaction.

A summary about European and national regulations, which limit the production of excessive sound levels, is provided, and a general overview about the health problems caused due to noise exposure is given.

The main goal is to perform a compilation of strategies that aim to reduce noise through the use of ecological and innovative solutions. Some of them are purely ecological, systems that only make use of vegetative systems or of the local configuration, to optimize the noise mitigation. Alternatively, other innovative systems or strategies can be used, that may be applied to road or rail noise, which aim to modify or introduce components to the existing noisiest elements.

Keywords: Europe overview, road noise, railway noise, mitigation, sustainable solutions.

This work was developed within the scope of project “METASHIELD”, funded by FCT – Foundation for Science and Technology and COMPETE, with reference PTDC/ECM-COM/1364/2014.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	ii
ABSTRACT	iii
1 Introdução	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Objetivos	2
1.3 Estrutura da dissertação	3
2 Ruído nas cidades	5
2.1 Noções básicas	5
2.2 Instrumento de avaliação de ruído	8
2.2.1 Mapa estratégico de ruído.....	8
2.2.2 Modelo TWINS	9
2.3 Principais fontes de ruído	10
2.3.1 Estradas.....	12
2.3.2 Caminhos de ferro	15
2.3.3 Aeroportos	19
2.3.4 Indústria	22
2.4 Impacto do ruído na saúde	24
2.4.1 Incómodo e distúrbios de sono	25
2.4.2 Outros problemas de saúde e bem-estar	27
2.5 Aspetos legais	29
2.5.1 Diretiva 2002/49/CE do Parlamento Europeu e do Conselho	29
2.5.2 Regulamento Geral do Ruído	31
2.5.3 Decreto-Lei n.º 146/2006	33
3 Estratégias de mitigação	36
3.1 Introdução	36
3.2 Barreiras inovadoras e ecológicas.....	37
3.2.1 Barreiras feitas com materiais reciclados	37
3.2.2 Barreiras acústicas verticais que integrem sistemas de plantas e solo	39
3.2.3 Barreiras de baixa altura	40
3.2.4 Aplicação de acessório em vegetação	43
3.2.5 Cristais sónicos	43
3.2.6 Bermas de terra.....	45
3.2.7 Árvores, arbustos e sebes.....	46
3.3 Tratamento de pavimentos rodoviários.....	50
3.3.1 Interação pneu-pavimento	50
3.3.2 Tratamento do pavimento.....	52

3.4	Tratamento do solo envolvente às vias	56
3.4.1	Matrizes de elementos rugosos em solos duros.....	57
3.4.2	Cascalho	60
3.4.3	Coberturas macias.....	61
3.4.4	Campos agrícolas.....	62
3.5	Tratamento de fachadas e telhados	62
3.5.1	Fachadas verdes	63
3.5.2	Telhados verdes	65
3.6	Medidas exclusivas para ruído ferroviário.....	66
3.6.1	Design e manutenção da roda.....	66
3.6.2	Sistemas para o carril.....	67
3.6.3	Imperfeições e manutenção da linha	69
3.6.4	Introdução de elementos resilientes e elastoméricos.....	69
3.6.5	Barreiras e trincheiras	70
3.7	Tratamento na fonte	71
3.7.1	Pneus.....	71
3.7.2	Veículos elétricos e híbridos	73
4	Conclusões e trabalhos futuros	78
4.1	Considerações finais	78
4.2	Trabalhos futuros	79
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	80

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

As cidades europeias, têm sofrido nos últimos anos um agravamento do ruído, fruto do aumento de vias de comunicação e do crescimento da indústria. O aumento da população e a necessidade de obter ligações que concretizem trajetos eficazes tanto a nível económico como de comodidade, são mais algumas razões que contribuem para o aumento do ruído.

As grandes cidades são zonas de alta densidade populacional, que têm na sua morfologia infraestruturas de transporte como estradas e caminhos de ferro, aeroportos e indústrias, que, por sua vez, são os principais emissores de ruído, afetando a população em larga escala.

De facto, estima-se (European Environmental Agency, 2014) que na Europa cada vez mais população esteja a ser afetada por este problema, originando, por vezes, casos em que a exposição ao ruído acaba por ser fatal. Na Europa ocidental, prevê-se, segundo um relatório da WHO (World Health Organization), que pelo menos um milhão de vidas são perdidas por ano devido a problemas de saúde causados só pelo ruído emitido nas estradas. Ainda neste relatório, a WHO classifica este distúrbio ambiental como o segundo principal causador de problemas de saúde, ficando apenas atrás das partículas ultrafinas (PM_{2.5}) que o ar poluído contém.

Irritação, distúrbio do sono, aumento do risco de problemas cardiovasculares e hipertensão são os principais problemas de saúde associados ao ruído. Alguns destes, nomeadamente os problemas cardiovasculares e hipertensão, estão associados a mortes prematuras, contribuindo assim, para redução da esperança média de vida. Para além disto, a presença de ruído diminui o desempenho escolar.

A END (Environmental Noise Directive - Diretiva 2002/49/CE do Parlamento Europeu e do Conselho) classifica ruído ambiental como sendo “*um som externo indesejado ou prejudicial, criado por atividades humanas, incluindo o ruído emitido por meios de transporte, tráfego rodoviário, ferroviário, aéreo e instalações utilizadas na atividade industrial (...)*”. A diretiva, não se aplica, porém, ao ruído emitido em atividades domésticas, em locais de trabalho, dentro de veículos ou produzido em atividades militares (dentro e fora de áreas militares).

O ruído provocado nas estradas é a principal fonte de ruído nas cidades europeias, afetando cerca de 125 milhões de pessoas, segundo estimativas da EEA (European Environmental Agency).

Também os caminhos de ferro, aeroportos e indústrias contribuem para valores excessivos de ruído nas cidades.

A previsão do ruído e o seu mapeamento é conseguido através de mapas de ruído que devem ser elaborados por autoridades competentes.

Depois de recolhidos os dados, devem ser traçadas estratégias que pretendam combater o ruído na fonte emissora, no meio de propagação e/ou no recetor, definindo assim estratégias de mitigação.

A utilização de materiais naturais como plantas ou solos, ou materiais reciclados, para conceção de barreiras acústicas é uma forma de responder às necessidades da população, sem comprometer o meio ambiente e, portanto, os recursos naturais das gerações futuras. São então consideradas soluções sustentáveis, aliando assim a mitigação à conservação do meio ambiente.

Pequenos gestos como a reciclagem de materiais de indústrias locais, ou a utilização de sistemas vegetativos, ajudam a diminuir a pegada ecológica, contribuindo para a sustentabilidade do planeta.

1.2 Objetivos

Esta dissertação de mestrado, faz uma compilação estratégias de mitigação, ecológicas e inovadoras, que visem o combate ao ruído, apresentando soluções no que se refere ao tratamento de pavimentos, aos meios de transporte em causa e à implementação de barreiras acústicas tradicionais, ecológicas e inovadoras. É também objetivo da mesma, apresentar uma base legislativa que defina as entidades responsáveis pela recolha de informação, tratamento da mesma e definição de estratégias a tomar, bem como evidenciar o real panorama dos problemas causados pelo ruído nos seres humanos.

Os números apresentados neste documento servem de consciencialização para um problema que incomoda o povo europeu e que pode ser fatal para a geração presente, bem como para a geração vindoura.

1.3 Estrutura da dissertação

O capítulo 2, Ruído nas Cidades, inicia-se, no subcapítulo 2.1., com uma revisão de conceitos teóricos, como a escala decibel, a sensibilidade auditiva humana, curvas de ponderação, aparelhos de captação de ruído e indicadores de ruído, e com a apresentação das preocupações e objetivos do Parlamento Europeu e do Conselho no que toca à política ambiental a aplicar na Europa.

No subcapítulo 2.2. define-se “mapa de ruído” segundo a END e dá-se um exemplo deste tipo de instrumento de previsão. É exposto o modelo TWINS usado para analisar fontes de ruído em veículos ferroviário.

Em 2.3. é apresentado o panorama geral do ruído na Europa, seguindo depois para o panorama particular das 4 fontes principais: estradas, caminhos de ferro, aeroportos e indústrias.

As fontes que mais afetam os cidadãos são as estradas e os caminhos de ferro e, por isso, opta-se por expor mais informação relativamente ao ruído produzido nestes dois meios de transporte.

No subcapítulo 2.4. abordam-se os principais problemas de saúde que o ruído pode causar e apresentam-se dados recolhidos pela EEA que estimam o número de pessoas afetadas por um determinado problema de saúde causado pelo ruído excessivo.

Em 2.5. é tratado um documento europeu: a diretiva 2002/49/CE, mais conhecida como Diretiva do Ruído Ambiente (Environmental Noise Directive – END), elaborada pelo Parlamento Europeu e do Conselho; e dois nacionais: o Regulamento Geral de Ruído (RGR) inserido no Decreto-Lei n.º 9/2007 e o Decreto-Lei n.º 146/2006 que transpõe a END para a ordem jurídica interna.

No capítulo 3 são apresentadas estratégias de mitigação.

Em 3.1. é feita uma introdução ao tema, seguida do subcapítulo 3.2. no qual são apresentadas barreiras inovadoras e ecológicas.

Em 3.3. é feita uma abordagem detalhada sobre a interação do pneu com o pavimento, apresentando depois soluções para o tratamento de pavimentos.

No subcapítulo 3.4. apresentam-se diversas soluções para o tratamento do solo envolvente à via que constitui a fonte de ruído. Também os edifícios podem contribuir para a mitigação, e

por isso mesmo, no subcapítulo 3.5. exibem-se diversas soluções para o tratamento de fachadas e telhados.

Por a forma a lançar a discussão sobre um tema que está pouco explorado nos dias de hoje, são apresentadas no subcapítulo 3.6. medidas exclusivas para a mitigação do ruído ferroviário.

Em 3.7. faz-se referência ao uso de veículos elétricos e híbridos, e o uso de pneus silenciosos, como formas de combater o ruído na fonte.

Por fim, no capítulo 4, conclui-se a dissertação, fazendo as considerações finais, apontando perspectivas de trabalhos futuros.

2 RUÍDO NAS CIDADES

Neste capítulo são apresentados fundamentos relacionados com o ruído nas cidades. Inicialmente, dá-se algumas bases teóricas para facilitar a interpretação de informação ao longo do capítulo. Seguidamente apresenta-se um instrumento de previsão: mapa de ruído.

A visão geral do ruído nas cidades europeias, bem como as principais fontes de ruído são analisadas de seguida.

Por fim, enumeram-se os vários problemas de saúde que a exposição excessiva ao ruído pode causar e expõe-se uma base legislativa europeia e nacional que aborda os níveis de ruído na comunidade.

2.1 Noções básicas

O ruído pode ser definido como uma variação da pressão atmosférica capaz de ser detetada pelo ouvido humano e cuja presença é indesejável. A sua caracterização pode ser efetuada através da medição do seu nível de pressão sonora (em dB).

O cálculo do nível de pressão sonora (L_p) é efetuado através do logaritmo da razão da pressão sonora em estudo (p) com a pressão sonora de referência ($p_0=2\times 10^{-5}$ Pa), multiplicado por vinte.

$$L_p = 10 \times \log_{10} \left(\frac{p}{p_0} \right)^2 = 20 \times \log_{10} \left(\frac{p}{p_0} \right) \quad (1)$$

O nível de pressão sonora expresso em dB não é o mais indicado para a representação da sensação auditiva humana e, por isso, é necessário ponderar o nível através de um coeficiente dependente da frequência.

Este coeficiente penaliza as componentes graves e agudas e ajusta-as à gama de captação suportada pelo ouvido humano, originando assim, uma curva que correlaciona os valores medidos, com a incomodidade do sinal sonoro: curva de ponderação A.

A Figura 2.1., dispõe quatro curvas de ponderação, A, B, C e D, que são utilizadas em medições de ruído, com o objetivo de avaliar a resposta do ouvido humano.

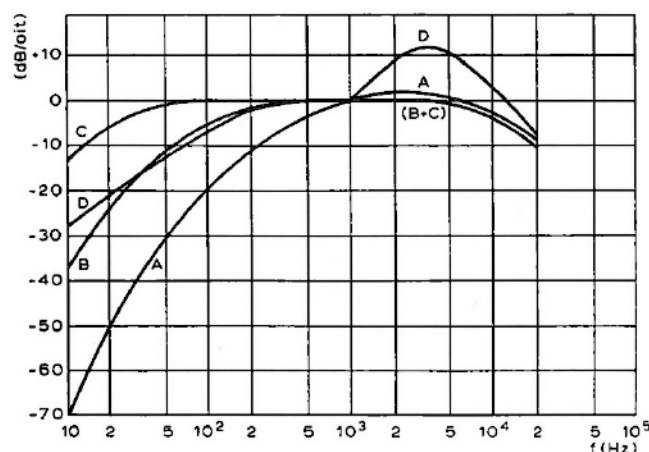


Figura 2.1. Curvas de ponderação resultantes da resposta do ouvido humano (Tadeu et al, 2010)

A captação do nível sonoro pode ser feita através de sonómetros, que permitem adquirir diversos indicadores de ruído: instantâneos (SPL), médios (L_{Aeq}), estatísticos ou níveis percentis (L_{95} , L_{50} , L_{10}) e máximos e mínimos (L_{max} , L_{min}).

No tratamento dos dados obtidos, podem ser utilizados vários indicadores para expressar o nível de ruído, diferenciando-se nos períodos de tempo diários nos quais se obtêm os dados, ou nas unidades em que se apresentam os resultados.

O nível sonoro contínuo equivalente, L_{Aeq} , ponderado A, é registado em situações reais e a variável é o período de tempo da medição:

$$L_{Aeq} = 10 \times \log_{10} \left(\frac{1}{T} \times \int_0^T \left(\frac{p(t)}{p_0} \right)^2 dt \right) \quad (2)$$

em que T é o período de medição, $p(t)$ é a pressão sonora instantânea e p_0 é a pressão sonora de referência (2×10^{-5} Pa).

Para a exposição de dados relativos a uma comunidade, é comum apresentar o indicador de ruído diurno, L_d , obtido durante o período diurno (das 7h às 20h), indicador de ruído do entardecer, L_e , obtido durante o período do entardecer (das 20h às 23h) e o indicador de ruído noturno (L_n), obtido durante o período noturno (das 23h às 7h).

É também utilizado frequentemente o indicador de ruído diurno-entardecer-noturno, L_{den} , que se obtém ponderando o nível de ruído na medição (diurna, entardecer ou noturna) com o seu período de referência, obtendo-se assim uma estimativa global:

$$L_{den} = 10 \times \log_{10} \frac{1}{24} \left[13 \times 10^{\frac{L_d}{10}} + 3 \times 10^{\frac{L_e+5}{10}} + 8 \times 10^{\frac{L_e+10}{10}} \right] \quad (3)$$

A utilização destes indicadores está também relacionada com o método de obtenção dos níveis e com o plano de ação traçado. Por exemplo, no relatório da EEA (European Environment Agency's), tratado em pormenor mais à frente, os indicadores associados aos mapas de ruído são o L_{den} e o L_n estabelecidos pelo Parlamento Europeu e do Conselho como os indicadores necessários para avaliar o incómodo e as perturbações do sono, respetivamente. Então, a exposição da comunidade ao ruído, bem como a comparação com valores prejudiciais à saúde humana é efetuada com base nestes indicadores.

O ruído produzido nas cidades é um problema real para a saúde dos seus habitantes. A exposição excessiva ao ruído pode simplesmente incomodar, mas por outro lado pode produzir graves problemas de saúde ou até matar. Problemas cardíacos, mentais ou cognitivos são exemplos de efeitos negativos na saúde humana.

É então imperativo que se intervenha de modo a alterar o rumo dos acontecimentos.

As diretivas portuguesas e europeias, têm vindo a caminhar no sentido de diminuir significativamente os níveis de ruído na cidade, e existem inclusive incentivos que visam beneficiar quem adotar uma visão ecológica a este nível.

Algumas estratégias que visam intervir na fonte de ruído e no seu uso, no meio de propagação, no ambiente da cidade e no recetor, podem ajudar a mitigar o ruído.

A utilização de barreiras acústicas vegetais, cristais sónicos refratores, fachadas verdes ou veículos elétricos, são algumas estratégias para diminuir o impacto do ruído na saúde da população.

A 20 de novembro de 2013 o Parlamento Europeu e do Conselho reuniu para definir o 7º Programa de Ação Ambiental (PAA), afeto ao tema “Viver bem, dentro dos limites do nosso planeta”, com o intuito de definir as linhas guia para a política ambiental a aplicar à Europa até 2020. De entre os vários objetivos traçados (Parlamento Europeu e do Conselho, 2013) destaca-se “a proteção dos cidadãos da União contra pressões de carácter ambiental e riscos para a saúde e bem-estar”.

A densidade populacional da UE é elevada, com mais de 70% dos seus cidadãos a viver em zonas urbanas e periurbanas, onde enfrentam problemas ambientais e climáticos específicos. De facto, os dados disponíveis sobre uma exposição média ao ruído a longo prazo mostram que 65 % dos europeus que vivem em grandes áreas urbanas estão expostos a níveis elevados

de ruído ⁽¹⁾, e mais de 20% a níveis de ruído noturno que, com frequência, têm efeitos adversos na saúde.

A prioridade é aplicar uma política atualizada da União em matéria de ruído, alinhada pelos conhecimentos científicos mais recentes, e as medidas de combate à poluição sonora na fonte, incluindo melhorias na conceção urbanística.

A 25 de Junho de 2002 o Parlamento Europeu e do Conselho publicaram a diretiva 2002/49/CE, Diretiva do Ruído Ambiente (Environmental Noise Directive – END) cujo artigo 7 refere que os Estados-Membros devem garantir que, até 30 de Junho de 2012 e, daí por diante de cinco em cinco anos, sejam elaborados e, se for caso disso, aprovados pelas autoridades competentes mapas estratégicos de ruído relativos à situação no ano civil anterior para todas as aglomerações e para todos os grandes eixos rodoviários com mais de seis milhões de passagens de veículos por ano, os grandes eixos ferroviários com mais de 60 000 passagens de comboios por ano e os grandes aeroportos situados nos seus territórios (Parlamento Europeu e do Conselho, 2002).

2.2 Instrumento de avaliação de ruído

2.2.1 Mapa estratégico de ruído

A END classifica (Parlamento Europeu e do Conselho, 2002) um mapa de ruído como sendo “*um mapa para fins de avaliação global da exposição ao ruído em determinada zona, devido a várias fontes de ruído, ou de estabelecimento de previsões globais para essa zona*”.

Por outro lado, refere que a elaboração de mapas de ruído envolve “*uma compilação de dados sobre uma situação de ruído existente ou prevista em termos de um indicador de ruído, demonstrando a ultrapassagem de qualquer valor-limite pertinente em vigor, o número de pessoas afetadas em determinada zona, o número de habitações expostas a determinados valores de um indicador de ruído em determinada zona*”.

A Figura 2.2., serve de exemplo deste tipo de elemento. É o mapa de ruído de uma zona de Dublin, cujo objeto de estudo foi a descrição do “ruído produzido nas estradas”. Em tons de azul, estão as artérias principais dessa zona, que são naturalmente mais ruidosas. Em tons alaranjados estão zonas mais tranquilas da cidade, cujos níveis são mais baixos.

¹ Segundo a END, «Níveis elevados de ruído» são definidos como níveis de ruído acima de 55dB (L_{den}) e de 50dB (L_n)



Figura 2.2. Exemplo de um mapa de ruído com origem em estradas (European Environmental Agency, 2014)

2.2.2 Modelo TWINS

Num veículo ferroviário, o design do carril e da própria roda podem ter influência no ruído emitido, é o que prova o modelo TWINS (Track Wheel Interaction Noise Software) que fornece um modelo teórico do ruído gerado no rolamento. O seu desenvolvimento foi começado em 1970 por Remington e, atualmente é comercializado pelo ERRI (European Rail Research Institute).

Este processo de modelação é capaz de separar os ruídos provenientes da roda, do carril e das vigas de madeira. Assim, é possível apontar qual é o componente que mais contribui para a geração do ruído.

Este *software* permite também testar diferentes tipos de veículos ferroviários e avaliar: a geometria dos carris e das rodas, os materiais, os efeitos da velocidade, o sistema de fixação dos carris, as superfícies da roda/carril, o amortecimento da roda/carril e a blindagem da roda e do trilho.

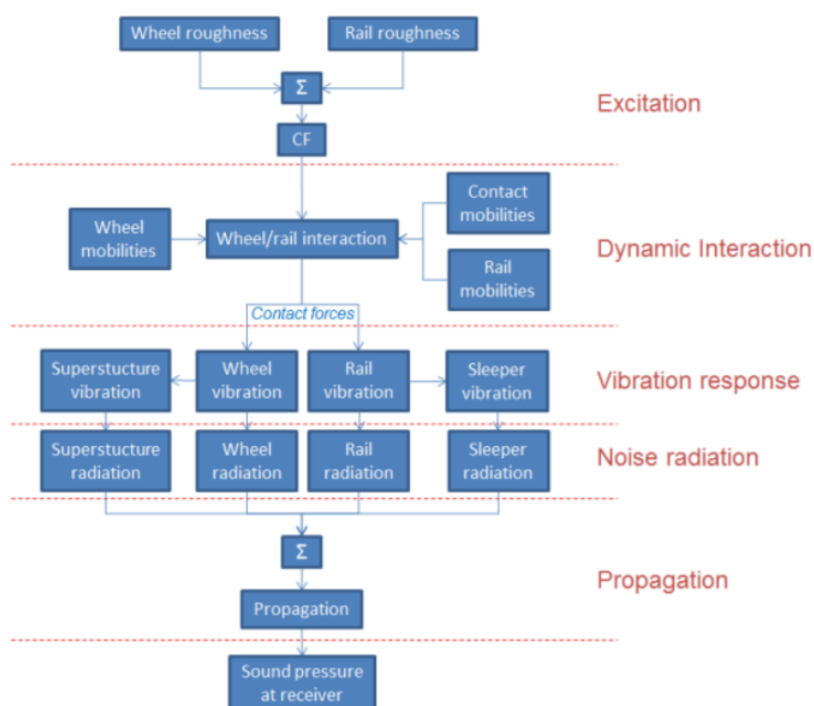


Figura 2.3. Fluxograma do modelo TWINS (<https://www.tno.nl/media/2479/twins.pdf>)

2.3 Principais fontes de ruído

A END classifica como ruído ambiente “*um som externo indesejado ou prejudicial, criado por atividades humanas, incluindo o ruído emitido por meios de transporte, tráfego rodoviário, ferroviário, aéreo e instalações utilizadas na atividade industrial*” (Parlamento Europeu e do Conselho, 2002).

Também na END, são dadas diretrizes a aplicar por parte dos Estados-membros para o sistema de identificação das fontes, mapas de ruído e avaliações de exposição ao ruído.

Apesar dos esforços feitos, pelo Parlamento Europeu e do Conselho, para controlar os níveis de ruído, a colaboração dos Estados-Membros não é total. De facto, o número de cidades cujos níveis de ruído foram reportados até 2012, é menor do que o número de cidades que a END incentiva a monitorizar. É então necessário estimar dados a fim de elaborar uma análise completa e conclusiva dos níveis de ruído na Europa. Esta análise é elaborada num relatório da European Environmental Agency (EEA), cujo título é “Noise in Europe”.

De acordo com este relatório, 471 áreas urbanas, num total de 34 cidades Europeias, foram avaliadas relativamente ao ruído ambiente. A avaliação incluí 91 aeroportos, 181 767 km de estradas e 40 066 km de caminhos de ferro.

Através de mapas de ruído foi possível a separação em 4 grandes fontes: estradas, caminhos de ferro, aeroportos e indústrias (Figura 2.4.).

É estimado pela EEA, através de figuras calculadas e dados recolhidos, que 125 milhões de pessoas podem estar expostas a níveis de ruído superiores a 55 dB (L_{den}) proveniente das estradas, dentro e fora de zonas urbanas, nas quais 37 milhões estão expostas a níveis de ruído superiores a 65 dB (L_{den}).

Na Figura 2.4., é de fácil compreensão que a fonte que mais contribui para o ruído ambiente em áreas urbanas são as estradas, sendo que cerca de 87% do ruído provém desta fonte, 9% dos caminhos de ferro, 3% dos aeroportos e apenas 1% da indústria. Os dados reportados no gráfico abaixo foram extrapolados de um banco de dados que, por ser inferior ao aconselhado na END, apresenta números que podem ser inferiores aos reais.

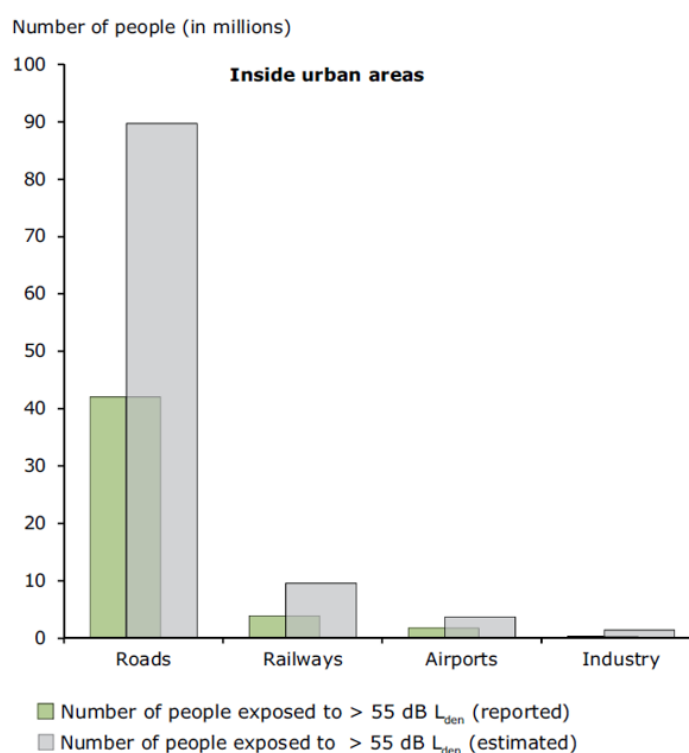


Figura 2.4. Número de europeus expostos a um nível de ruído $L_{den} > 55$ dB nos países Estados-Membros da União Europeia: dados recolhidos e estimados (European Environmental Agency, 2014)

Pode ser vantajoso, dividir os níveis de ruído por patamares, visto que a diversidade de problemas de saúde, bem como das estratégias de mitigação, estão diretamente relacionadas com o nível de ruído experimentado em determinada zona. A END exige que se faça uma

divisão por 5 patamares (55-59 dB (L_{den}), 60-64 dB (L_{den}), 65-69 dB (L_{den}), 70-74 dB (L_{den}) e >75 dB (L_{den})) (Figura 2.5).

A grande maioria dos europeus são afetados por níveis de ruído na ordem dos 55 a 69 dB, sendo que as estradas são as fontes que mais contribuem para estes números.

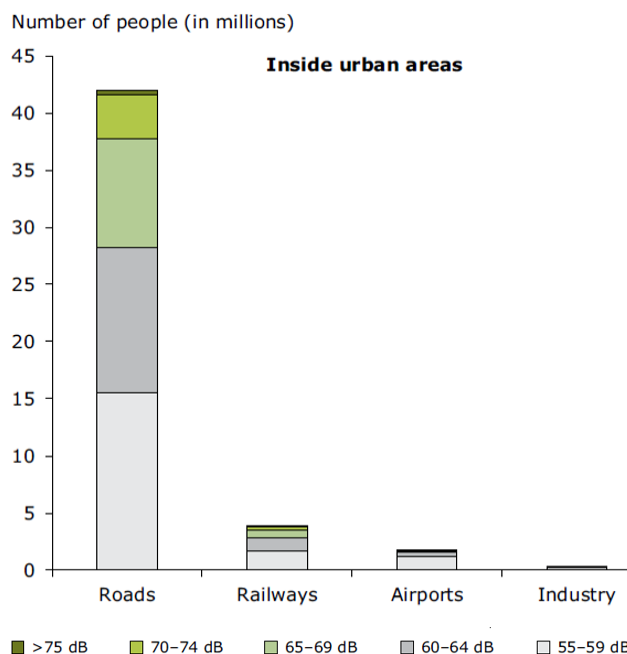


Figura 2.5. Divisão por patamares: número de europeus expostos ao ruído (European Environmental Agency, 2014)

De seguida, faz-se uma análise e respetiva comparação, do ruído provocado pelos setores dos transportes e da indústria.

2.3.1 Estradas

Esta é a fonte que mais afeta o povo europeu e que mais pessoas afeta com altos níveis sonoros. Os indicadores L_{den} e L_n são os utilizados para traduzir estes níveis. Isto é válido para a escala nacional, regional, dentro e fora das grandes zonas urbanas.

O ruído provocado nas estradas tem origem na interação do pneu do veículo com a estrada (rolamento) e no ruído provocado pelo motor do veículo, transmissão e tubo de escape (propulsão). Um terceiro tipo de ruído, proveniente da aerodinâmica, pode ser tido em conta, porém este só é considerado para grandes velocidades (200 km/h ou mais) ou quando o ruído proveniente do rolamento é extremamente baixo.

A Figura 2.6. relaciona o nível de ruído emitido pela propulsão e rolamento do veículo com a sua velocidade de circulação. É disponibilizado um gráfico para veículos ligeiros e um para veículos pesados.

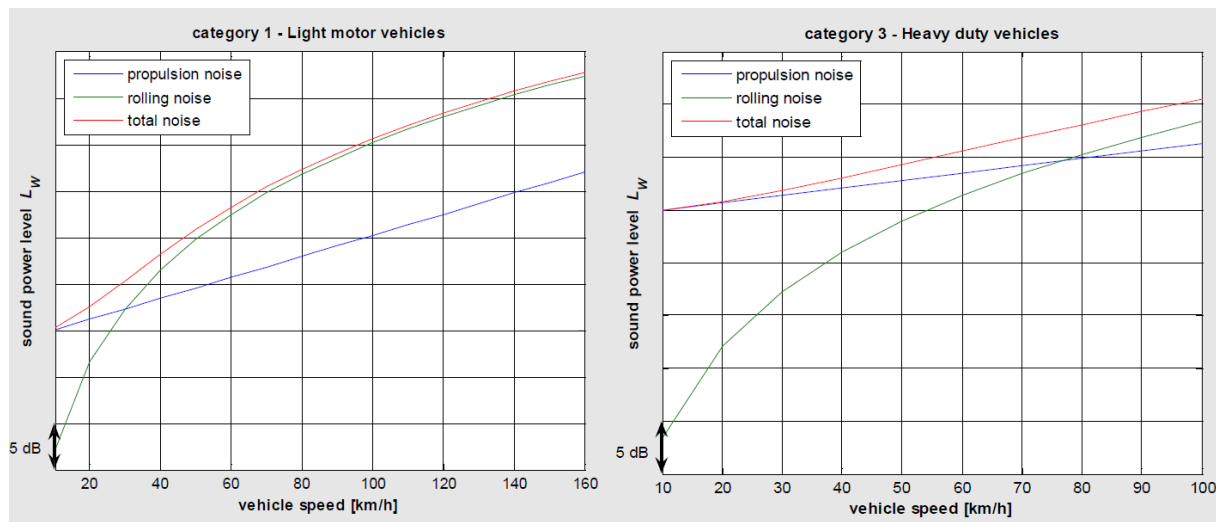


Figura 2.6. Nível de ruído proveniente do rolamento ou da propulsão, em função da velocidade. Esquerda: Veículo ligeiros; direita: veículos pesados (Blockland e Graff, 2012)

Para velocidades inferiores a 30 km/h para veículos ligeiros e 80 km/h para veículos pesados, o ruído dominante provém da propulsão. Para velocidades acima destes valores o ruído é provocado maioritariamente pelo rolamento.

O ponto em que os gráficos da propulsão e do rolamento se cruzam, dita a troca de dominância do ruído de propulsão para o do rolamento.

A intensidade da emissão depende de 4 componentes: o tipo de veículo, a sua velocidade, aceleração/desaceleração ou condução em estrada ingreme, propriedades específicas do veículo, pneus e superfície da estrada (Blockland e Graff, 2012).

O estudo feito pela EEA, que contou com dados de 294 áreas urbanas dos países membros da União Europeia, permite entender qual a dimensão do dano provocado pelo ruído proveniente das estradas (Figura 2.7.).

Em cidades com mais do que 100 000 habitantes, de países como Áustria, Estónia, Irlanda, Lituânia, Holanda, Polónia, Roménia, Espanha e Suíça, mais de 50% dos habitantes estão expostos a níveis de ruído acima dos 55 dB (L_{den}). Em países como a Bélgica, Bulgária e Luxemburgo, este número supera os 75%. Dois dos fatores que mais influenciam estes valores são o número de áreas urbanas por país e o número total de habitantes por área urbana.

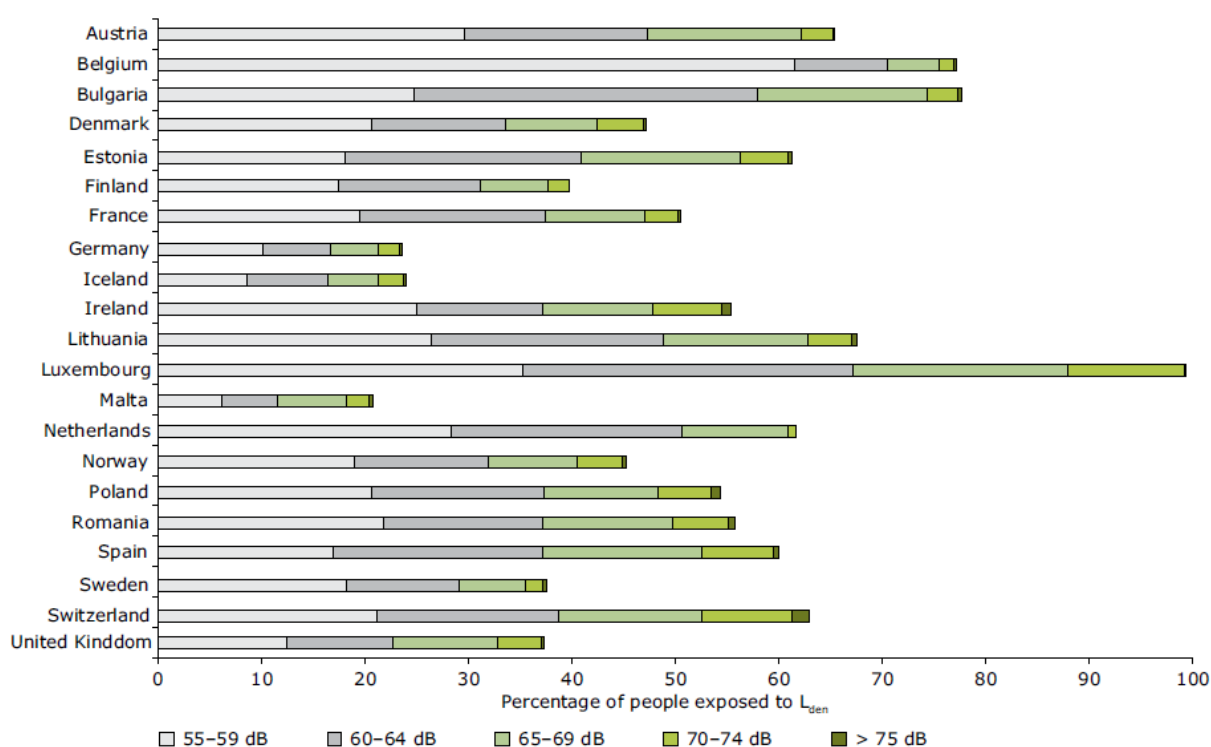


Figura 2.7. Percentagem de população exposta a níveis de ruído (L_{den}), rodoviário, em 294 áreas urbanas, dos países membros da União Europeia (European Environmental Agency, 2014)

Também neste estudo foi verificado que a maior percentagem de pessoas está sujeita a níveis de ruído entre os 55 e os 64 dB (L_{den}), estando a percentagem mais baixa exposta aos níveis mais altos (de 65dB a $L_{den} > 75$ dB). Porém, quando consideradas cidades com mais habitantes (entre 100 000 e 250 000 habitantes), sobe a percentagem de pessoas expostas a níveis altos de ruído.

Dados relativos (European Environmental Agency, 2014) a 71 áreas urbanas, recolhidos em 2007 e 2012 permitem relatar uma descida do número de pessoas expostas a níveis elevados de ruído (Figura 2.8.).

Esta descida deve-se maioritariamente à influência que o Reino Unido teve na globalidade dos resultados. Curiosamente, este é dos poucos países que apresenta uma subida para patamares na ordem dos 65-74 dB.

Todas estas observações são largamente influenciadas pela quantidade de dados recolhidos e fornecidos pelos países. Porém, existem países que dificultam a análise, não contribuindo com registos de níveis de ruído e, por isso, prejudicam a completa análise do panorama europeu.

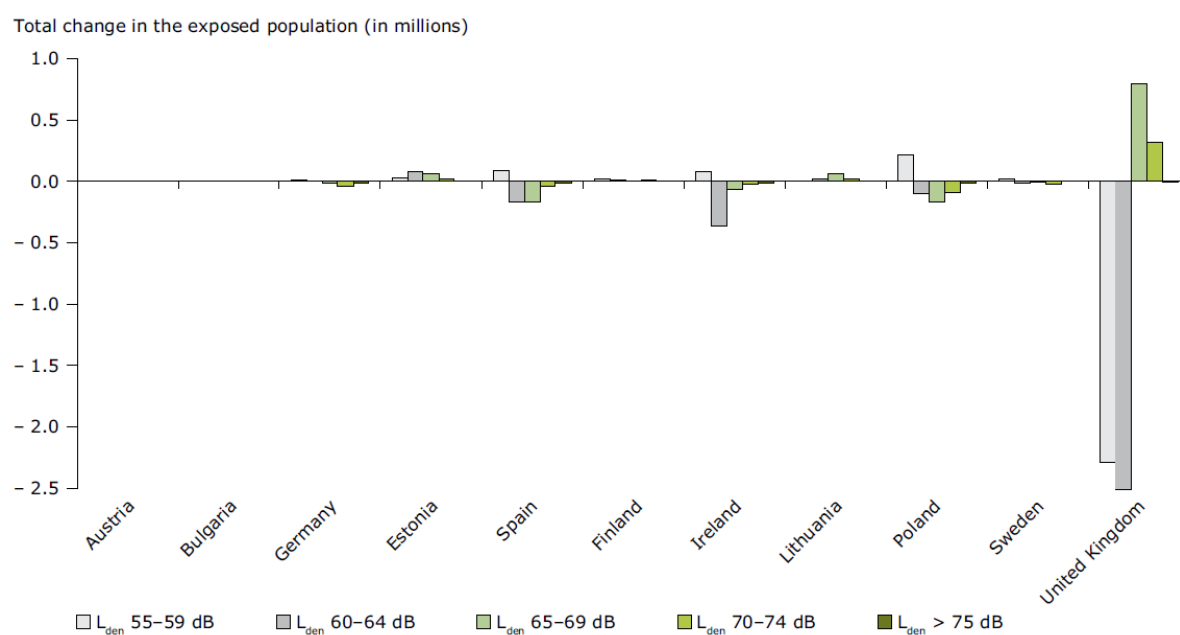


Figura 2.8. Diferença do número total de pessoas expostas a ruído rodoviário em zonas urbanas com mais de 250000 habitantes, a nível nacional, entre 2007 e 2012 (European Environmental Agency, 2014)

2.3.2 Caminhos de ferro

Em 2012, os caminhos de ferro eram (European Environmental Agency, 2014) a segunda maior fonte de produção de ruído na Europa, afetando cerca de 7 milhões de pessoas com níveis superiores a 55 dB (L_{den}), dentro e fora das zonas urbanas. As estimativas aumentam ainda mais este número, apontando para 14 milhões de pessoas afetadas, sendo que 9,5 milhões estão localizadas nas zonas urbanas.

Comparando com os números relativos às estradas (estimam-se 125 milhões de pessoas afetadas) existe uma diferença significativa. O comprimento da rede de estradas quando comparada com o da rede ferroviária, a introdução ou não dos elétricos urbanos ou outros veículos ferroviários leves no cálculo do mapa de ruído, ou o facto da maioria das redes ferroviárias serem subterrâneas, são algumas razões para estes números divergirem tanto.

A passagem de um comboio gera vibrações e ruído. Apesar de não se aconselhar dissociar estas duas componentes, nesta dissertação apenas se dará destaque ao ruído gerado pela passagem de um veículo ferroviário.

O ruído produzido neste meio de transporte pode ser dividido essencialmente em três fontes de ruído principais: rolamentos, equipamento motorizado e aerodinâmica.

As vibrações provenientes da interação dinâmica entre as superfícies dos carris e das rodas, ambos feitos em aço e encaixados entre si, produzem ondas de baixa amplitude que são radiadas, originando ruído por rolamento (<http://www.southampton.ac.uk>). Este é o tipo de ruído que maior relevância tem neste meio de transporte, aumentando numa proporção de $30 \log_{10}V$, onde V é a velocidade de circulação.

Associado ao ruído no rolamento, o “Curve Squeal” é um ruído tonal intenso que é produzido quando o veículo muda de trilho ou faz uma curva. O processo dá-se com a fricção lateral entre o próprio veículo e a roda, ou com a fricção do flange da roda contra o trilho. Quando ocorre o deslizamento é produzido então um ruído agudo. Este problema pode ser solucionado com lubrificação dos carris na zona de curvas.

O ruído produzido pelo equipamento motorizado é proveniente essencialmente do motor e está associado a manobras de baixa velocidade, nomeadamente a fase de aceleração e de travagem.

O ruído aerodinâmico, é produzido devido à resistência que o ar cria à passagem do veículo. Quando o fluxo de ar for turbulento, existe emissão de ruído, sendo que para altas velocidades (superiores a 300 km/h) a emissão é substancial. Áreas como a ligação pantógrafo-catenária são problemáticas. Também as zonas de intervalo e a interface turbulenta ar-superfície do comboio originam este tipo de ruído.

A intensidade e dominância de cada um depende (Clausen et al., 2014) diretamente da velocidade do veículo. Para baixas velocidades o ruído produzido pelo equipamento motorizado (traction noise) é dominante, para médias velocidades é o rolamento (rolling noise) e para altas velocidades começa a ser relevante o aerodinâmico (aerodynamic noise). Tal é ilustrado na Figura 2.9.

A circulação de veículos ferroviários faz-se para uma gama de velocidades de 30 a 200 km/h, nas quais o ruído proveniente do rolamento é dominante. As baixas velocidades estão normalmente associadas a zonas de manobras, perto das estações ou em caminhos de ferro dentro de fábricas. Velocidades superiores a 200 km/h, só se verificam em linhas de alta velocidade.

Os comboios de carga operam na gama dos 30 aos 200 km/h (sensivelmente aos 100km/h), e são considerados como o transporte ferroviário que mais contribui para a produção de ruído.

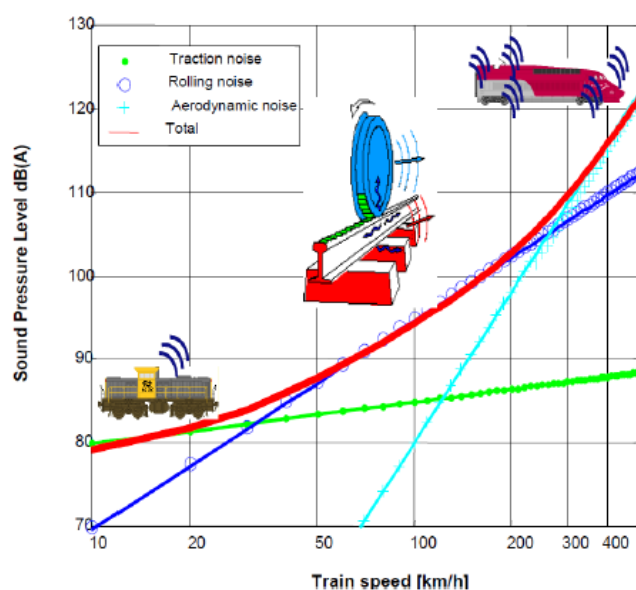


Figura 2.9. Fontes de ruído em função da velocidade (UIC 2008, página 7)

O quadro 2.1. classifica qualitativamente a relevância que a fonte tem na produção total de ruído, em função do meio de transporte considerado. É confirmada a relevância do ruído do rolamento.

Quadro 2.1. Relevância das fontes de ruído em transportes ferroviários (EC 2003)

Meio de transporte	Ruído por rolamento	Ruído eq. motorizado	Ruído aerodinâmico
Comboio de carga	++	+	Não é relevante
Comboios de alta velocidade	++	+	++
Intercidades e outros comboios de longa distância	++	+	Não é relevante
Urbanos	++	+	Não é relevante

Em zonas urbanas com mais de 100 000 habitantes, dentro da globalidade de pessoas afetadas por este tipo de ruído, existe uma percentagem de 74% que é afetada por níveis inferiores a 65 dB (L_{den}) e apenas 2% está exposta a 75 dB (para 270 das 460 áreas urbanas dos países membros da União Europeia).

Na Europa (Figura 2.10.), segundo dados submetidos em 2012, a média de indivíduos expostos a níveis superiores a 55 dB (L_{den}) situa-se nos 4,65%, com a Bélgica, Finlândia, França e Noruega, a registarem valores de 5%, enquanto a Áustria, Suécia e Suíça registaram valores que ultrapassaram os 10% (European Environmental Agency, 2014).

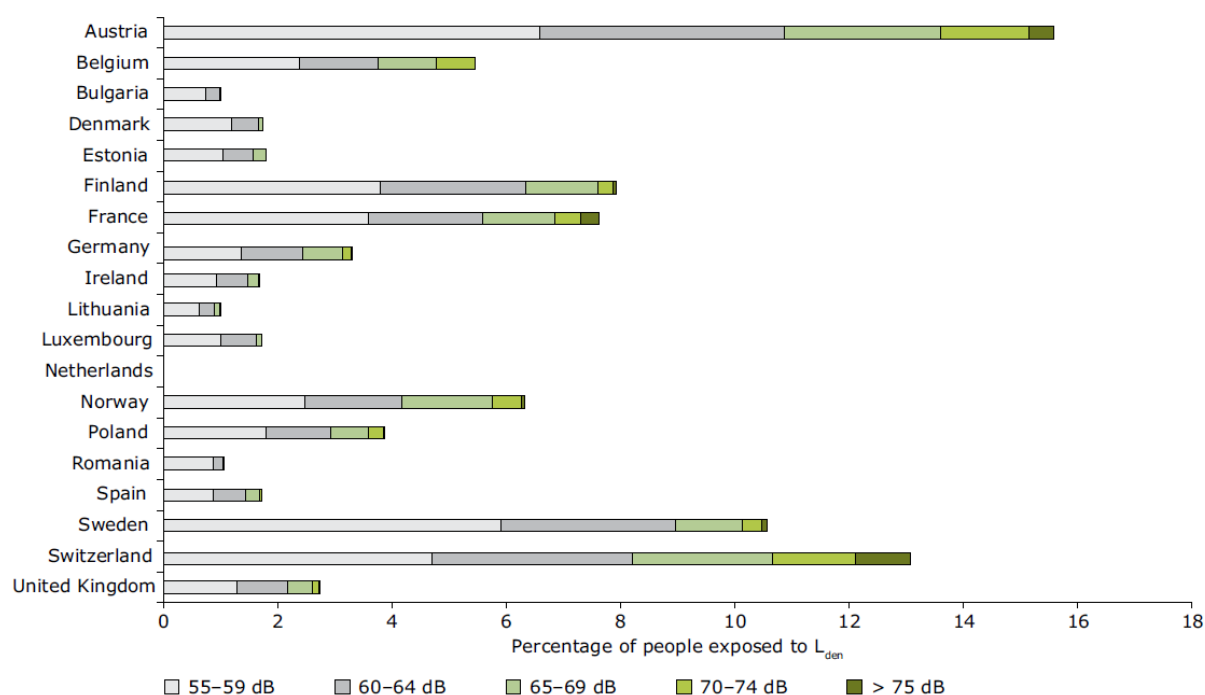


Figura 2.10. Percentagem de pessoas expostas a ruído ferroviário, L_{den} , em 270 áreas urbanas, nos países membros da União Europeia em 2012 (European Environmental Agency, 2014)

De 2007 até 2012, registou-se uma variação negativa, nos 5 patamares de nível sonoro, do número de pessoas expostas a este tipo de ruído. A análise teve em conta 68 áreas urbanas (com mais de 250 000 habitantes) que registaram informação tanto no ano de 2007 como no de 2012 (Figura 2.11.).

A Alemanha foi o país da Europa que registou a maior descida no número de pessoas afetadas e, por isso, é o país que contribui mais para o decréscimo global. Porém, países como a Finlândia, Irlanda, Espanha e Suécia sofreram um aumento deste indicador.

A diferença de magnitude de variação de país para país, pode ser explicada pelo número de quilómetros de linha ferroviária e tamanho do próprio país, mas também da maneira como os caminhos de ferro foram projetados.

Muitas das linhas existentes são linhas antigas, nas quais, aquando da sua construção, não era obrigatória a proteção contra o ruído. O seu uso continua a ser permitido, porém segundo a diretiva 2002/49/EC (END), muitos dos estados dos países europeus já investiram em medidas para reduzir o ruído ferroviário (Clausen et al., 2014).

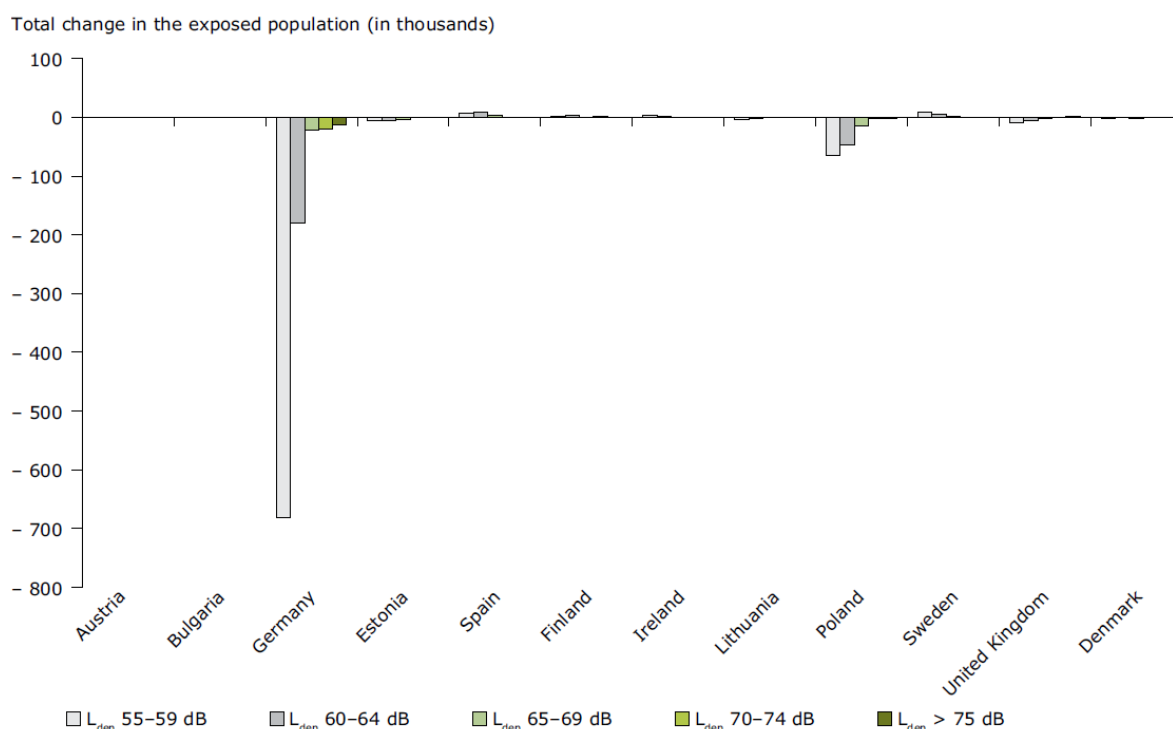


Figura 2.11. Diferença do número total de pessoas expostas a ruído ferroviário, L_{den} , em aglomerações de cada país, entre 2007 e 2012 (European Environmental Agency, 2014)

2.3.3 Aeroportos

Apesar do número de pessoas afetadas por este tipo de ruído ser menor que o das estradas ou caminhos de ferro, a sua incomodidade é superior às outras fontes de ruído. Ainda que nos últimos 30 anos se tenham feito esforços a nível do desenvolvimento tecnológico para combater o ruído na fonte, o impacto que um evento isolado, como é o voo de uma aeronave, tem nos níveis sonoros sentidos pela população é alto. Também o crescimento do volume de tráfego aéreo não tem ajudado à redução do número de pessoas afetadas pelo ruído, especialmente em períodos noturnos.

Segundo os dados de exposição ao ruído proveniente de aeronaves, recolhidos pela EEA, este só afeta as áreas vizinhas ao aeroporto. Tal acontece, porque apenas são recolhidos dados relativos a um dado aeroporto e às descolagens e aterragens que lá acontecem. Qualquer outro tipo de manobra não é considerada.

Assim, em zonas urbanas europeias, cerca de 2 milhões de pessoas são afetadas com níveis de ruído superiores a 55 dB (L_{den}), segundo dados de agosto de 2013. Para dados estimados, este número aumenta para 3,7 milhões. É também reportado que em cada país existe um aeroporto,

normalmente localizado na capital, que tem de longe os números mais altos relativos a este tipo de ruído.

Conclui-se que a quantidade de pessoas expostas a este tipo de ruído depende do volume de tráfego aéreo e de fatores locais como a localização e a envolvente do aeroporto ou a densidade populacional. Isto permite afirmar que as cidades com um número elevado de pessoas expostas, podem não ser as que apresentam a percentagem mais elevada de pessoas expostas a níveis de ruído superiores a 55 dB (L_{den}) proveniente de aeroportos.

A Figura 2.12. ilustra as alterações que alguns países membros, sofreram no que toca ao número de habitantes expostos ao ruído proveniente de aeroportos no período de 2007 a 2012. A tendência tem sido, maioritariamente, a redução de pessoas expostas, como é o caso da Alemanha, Espanha, Noruega e Reino Unido. Porém, a Holanda ou a Irlanda, continuam numa tendência crescente.

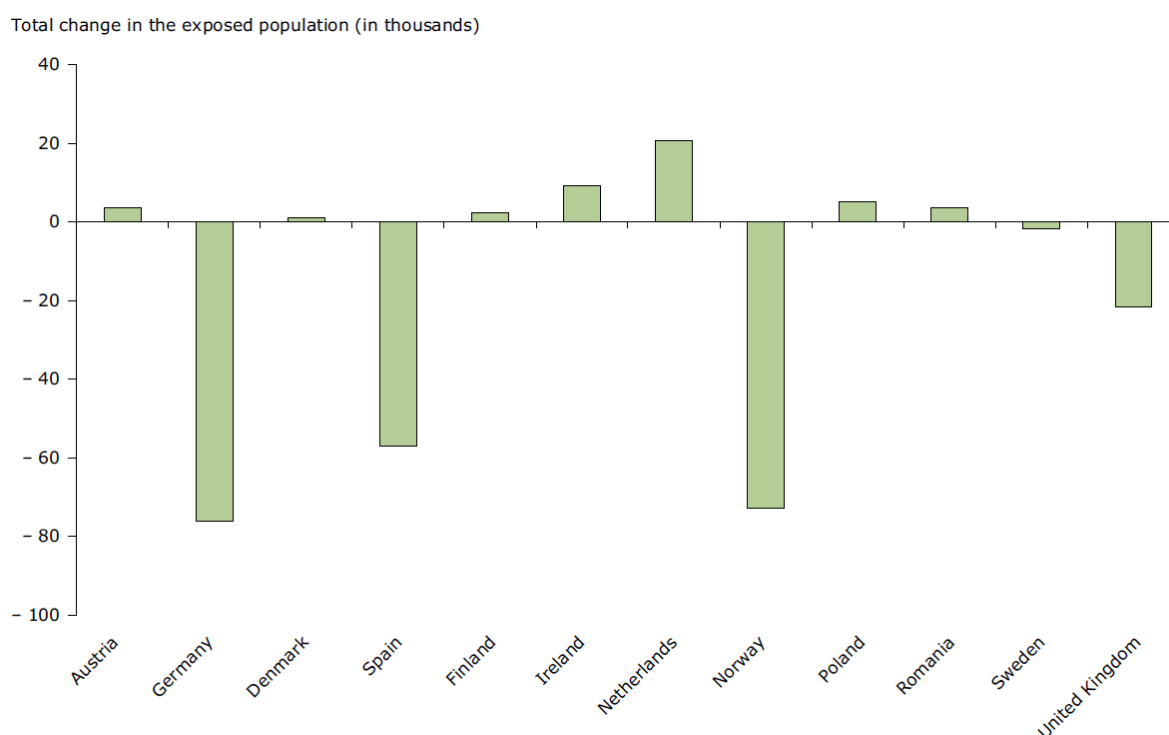


Figura 2.12. Mudança de população exposta a ruído proveniente dos maiores aeroportos dentro de zonas urbanas, >55 dB (L_{den}) (2007-2012) (European Environmental Agency, 2014)

Estes dados foram recolhidos de 46 grandes aeroportos com mais de 50 000 movimentos/ano. Apresenta-se de seguida um caso de estudo, do aeroporto de Warsaw (Varsóvia) Chopin, Polónia, de forma a demonstrar que a poluição sonora pode ser tratada como um conceito espacial (Mapa 2.1).



Mapa 2.1. Classes de terreno afetadas pelo ruído nos contornos do aeroporto Warsaw Chopin (European Environmental Agency, 2014)

O impacto do ruído proveniente do aeroporto, foi analisado através de um mapa de ruído e a apresentação de resultados foi feita considerando uma análise espacial da poluição sonora causada. Com a colaboração de sistemas geográficos de informação, é possível entender como é que o ruído pode afetar ecossistemas e a sua população.

As áreas sujeitas a níveis altos de ruído podem ser identificadas a uma escala local, nas quais a proximidade ao aeroporto e o ambiente são determinantes para o número de pessoas afetadas.

Através da projeção do gráfico (Figura 2.13.), que quantifica o nível de ruído experimentado em cada classe de terreno, é possível aprofundar a análise, contribuindo assim para traçar planos de prevenção em zonas particularmente sensíveis, como é o caso de hospitais ou escolas, ou outras zonas que se queiram estudar particularmente.

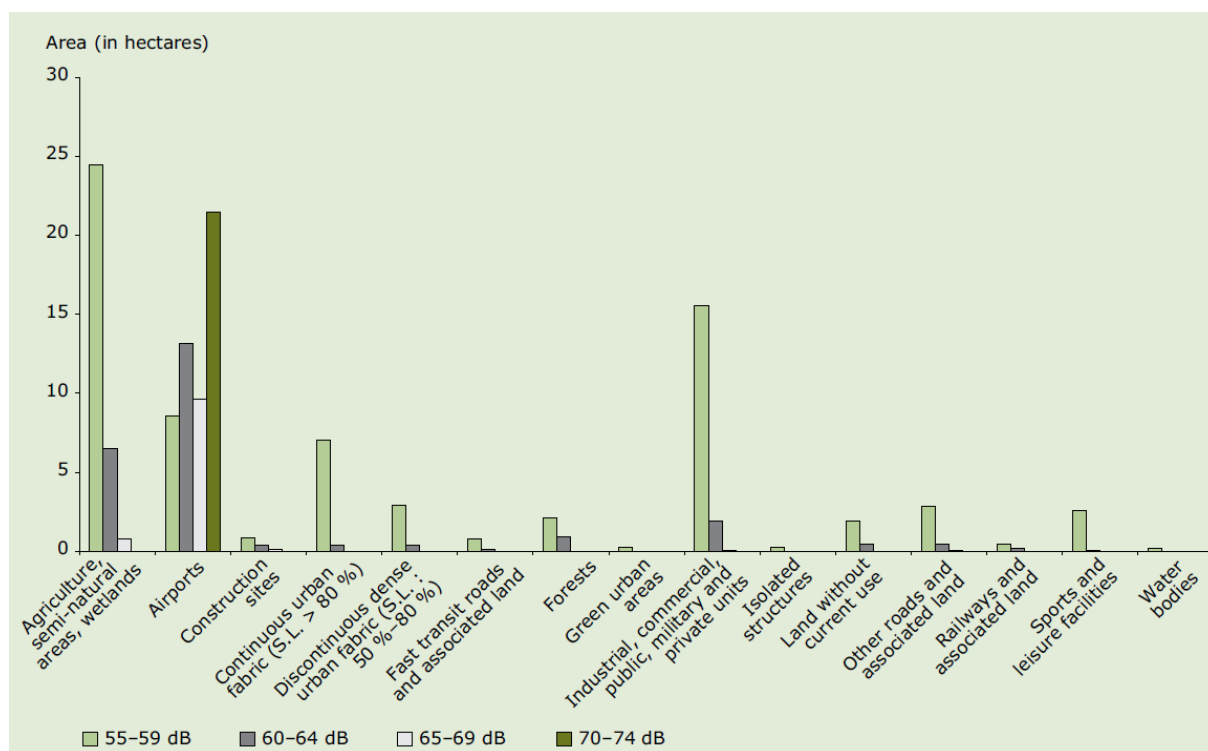


Figura 2.13. Classes de terreno afetadas pelo ruído nos contornos do aeroporto Warsaw Chopin (European Environmental Agency, 2014)

2.3.4 Indústria

Na Europa, cerca de 300 000 pessoas que vivem em zonas urbanas estão expostas a níveis de ruído provenientes de indústrias acima dos 55 dB (L_{den}). Se recorrermos a estimativas, este

número sobe para 1,4 milhões de pessoas afetadas. Assim, a indústria é de longe a fonte que apresenta valores mais baixos de pessoas afetadas no conjunto das 4 principais fontes de ruído.

Tal como nas outras fontes, a maior percentagem de pessoas afetadas situa-se nos níveis mais baixos (55-59 dB), sendo neste caso 74% do número total de pessoas expostas a valores altos de ruído industrial.

Nas zonas urbanas da Europa, a percentagem média de pessoas expostas a níveis de ruído industrial é de apenas 0,42% da população total que vive nessa zona.

As especificidades locais relativas à indústria influenciam imenso estes números. Vejamos, por exemplo (European Environmental Agency, 2014), o caso de Londres, que apesar de ser uma cidade com uma população elevada, apresenta apenas 0,2% de pessoas afetadas pelos ruídos industriais.

Já Klaipeda, Lituânia, apresenta 12,6% de pessoas afetadas. Naturalmente que a localização da zona industrial é um fator determinante, sendo que a população é menos afetada se a zona industrial estiver condensada numa só zona da cidade e longe da maior parte da população.

Analisando a Figura 2.14., é possível verificar uma heterogeneidade no que toca à evolução do número de pessoas expostas entre 2007 e 2008.

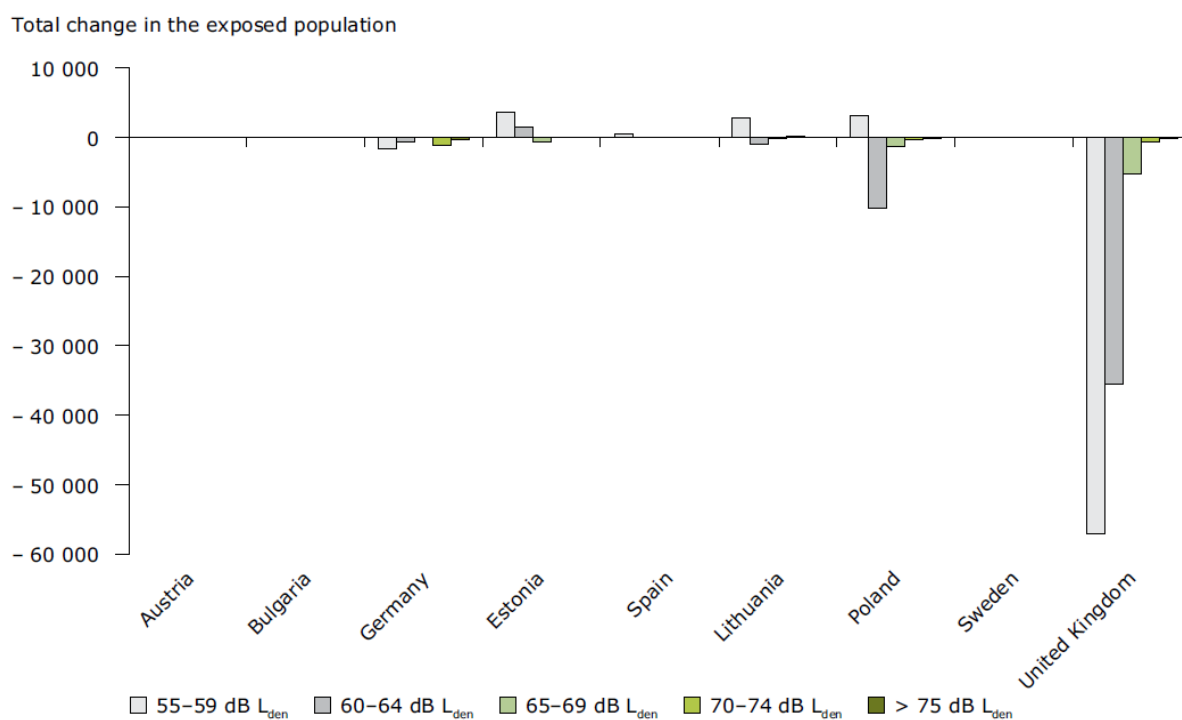


Figura 2.14. Mudança de população exposta a ruído industrial dentro de zonas urbanas, (L_{den}), a nível nacional (2007-2012) (European Environmental Agency, 2014)

Se por um lado temos descidas abruptas por parte do Reino Unido, por outro, temos subidas experimentadas na Estónia, Lituânia e Polónia. Estas grandes variações têm, porém, algo em comum: deram-se para níveis de ruído mais baixos (55-64 dB). Esta análise contou com dados de 65 zonas urbanas com mais de 250 000 habitantes.

2.4 Impacto do ruído na saúde

O ruído proveniente dos transportes e da indústria, pode levar a irritação, distúrbio do sono e aumento do risco de problemas cardiovasculares e hipertensão. Sendo estes últimos dois, comumente associados a mortes prematuras, pode afirmar-se que a exposição ao ruído contribui para redução da esperança média de vida. O ruído pode também diminuir o desempenho escolar (Basner et al., 2014).

Pode fazer-se uma divisão por faixas etárias mais afetadas pelos diversos problemas de saúde. A Tabela 2.1. faz esta correspondência, tendo por base uma relação de exposição-resposta baseada em análises de vários estudos, e refere também o(s) artigo(s) em que se baseou a correspondência efetuada.

Health and well-being effect	Population	Reference
(Severe) annoyance	Adults	Road traffic and railways: Miedema and Oudshoorn, 2001; industry: Miedema and Vos, 2004; aircraft: Janssen and Vos, 2009
(Severe) sleep disturbance	Adults	Road traffic, railways and industry: Miedema and Vos, 2007; aircraft: Janssen and Vos, 2009
Reading impairment	7 to 17-years old	Only aircraft: adapted from Clark et al., 2006
Hypertension	Total population	Road traffic, railways and industry: Van Kempen and Babisch, 2012; aircraft: Babisch and Van Kamp, 2009
Coronary heart disease (mortality and morbidity)	Total population	All sources: Vinneau et al., 2013
Stroke (mortality and morbidity)	Total population	All sources: ad hoc meta-analysis based on 6 studies (Huss et al., 2010; Sørensen et al., 2011; Hansell et al., 2013; Correia et al., 2013, Floud et al., 2013; de Kluizenaar et al., 2013)

Tabela 2.1. Caraterísticas fundamentais da relação exposição-resposta aplicada (European Environmental Agency, 2014)

Os dados recolhidos em 2011, das distribuições da exposição de ruído proveniente de estradas, caminhos de ferro, aeronaves e indústrias, foram relacionados com a Tabela 2.1. para estimar o impacto que o ruído teria na saúde da população dos países membros da União Europeia.

Nesta análise não foi utilizado nenhum corretor na avaliação dos impactos na saúde e, por isso, estima-se que o panorama real dos impactos que o ruído tem na população europeia seja muito mais preocupante.

As estimativas para a irritação, distúrbios do sono e restringimento da leitura são feitas para subgrupos da população total (adultos e crianças), sendo que a irritação e distúrbios do sono podem ser estimados, combinando diretamente a distribuição da exposição do ruído com a relação exposição-resposta (para a fração da população que interessa). Esta relação é específica de cada fonte e baseada na análise de vários estudos, com exceção para o ruído industrial.

Segundo estudos do WHO (World Health Organization) em 1999, concluiu-se que a exposição prolongada ao ruído $L_{Aeq,24hr}$ (nível sonoro contínuo equivalente de um período 24 horas) entre 65 e 70 dB, provoca o aparecimento de problemas cardiovasculares. Desde essa data, foram publicados vários estudos relacionando o ruído ambiente com o predomínio da hipertensão, aparecimento de doenças coronárias (como o enfarte do miocárdio) e AVC's.

Desde 2010, foram publicados vários estudos que relacionam a exposição ao ruído, com o aparecimento de AVC's. Depois de efetuada uma metanálise, com base em 6 estudos ², conclui-se que o risco relativo é de 1.04 (intervalo de confiança de 95%: 1.00-1.09) por aumento de 10 dB na exposição ao ruído, que é similar ao valor registado por Vienneau et. al. (2013) para o mesmo parâmetro associado às doenças coronárias. Também é sugerido, no resultado desta análise, que o risco de hipertensão e problemas cardiovasculares é significativo a partir dos 50 dB (L_{den}).

Na recolha de dados, no que toca à hipertensão e problemas cardiovasculares, o impacto que uma fonte tem na saúde, depende do predomínio (frequência) ou da incidência (casos por ano).

2.4.1 Incómodo e distúrbios de sono

Segundo dados recolhidos pelos países em 2011 na Europa, cerca de 19,8 milhões de adultos a viver em cidades ou perto de grandes fontes emissoras de ruído, estão expostos a níveis de ruído iguais ou superiores a 55 dB (L_{den}), e, por isso, podem-se considerar “incomodados” pelo ruído. Destes, cerca de 9,1 milhões podem-se considerar “muito incomodados”.

É estimado que 7,9 milhões de adultos sofram de distúrbios do sono devido ao ruído noturno provocado nas estradas, linhas férreas, pelas aeronaves ou indústrias. 3,7 milhões deles têm graves problemas de sono (European Environmental Agency, 2014).

² Huss et al., 2010; Sørensen et al., 2011; Hansell et al., 2013; Correia et al., 2013; Floud et al., 2013; de Kluizenaar et al., 2013.

Como se pode verificar da Figura 2.15., as fontes de ruído que mais causam problemas de sono são as estradas, seguidas dos ruídos provocados por transportes aéreos, caminhos de ferro e por fim indústrias.

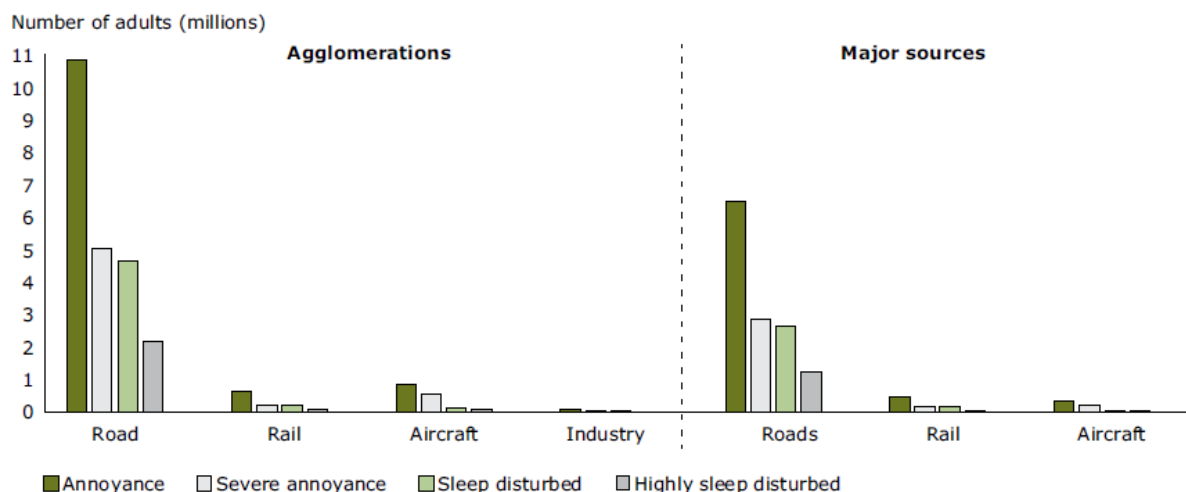


Figura 2.15. Estimativas do número de adultos que sofrem de irritação e (severos) distúrbios do sono, devido à presença de ruídos. Avaliação feita em aglomerações e perto da fonte (European Environmental Agency, 2014)

A grande fatia de adultos incomodados e com o sono perturbado, estão associados ao ruído proveniente das estradas (cerca de 90%), dos quais 65% ocorrem em aglomerações. A segunda fonte que mais contribui para o incómodo e distúrbios de sono, são as aeronaves.

A Figura 2.16. separa os níveis de ruído por patamares de 5 dB, a fim de determinar quais os níveis a que a maior parte dos indivíduos adultos incomodados pelo ruído, estão sujeitos.

Nas aglomerações, a maior parte (1,6 milhões) dos adultos incomodados está sujeita a níveis entre os 65-69 dB (L_{den}), enquanto perto das maiores estradas, este intervalo está nos 60-64 dB (L_{den}) e o número de adultos está nos 950 000.

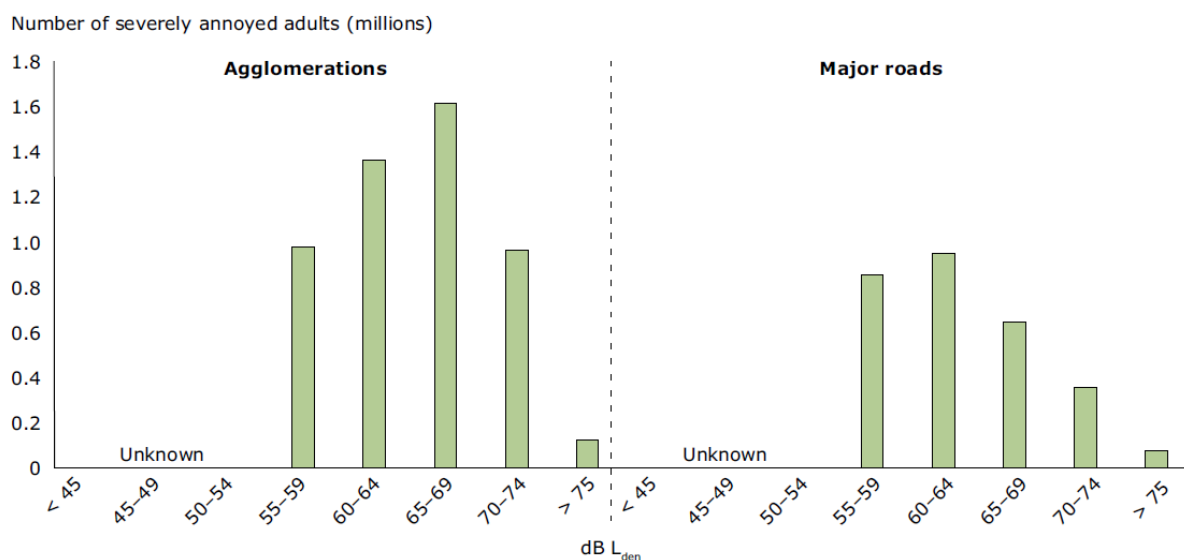


Figura 2.16. Estimativa do número de adultos incomodados severamente devido ao ruído (L_{den}) provocado nas estradas. Avaliação feita em aglomerações e perto da fonte. (European Environmental Agency, 2014)

2.4.2 Outros problemas de saúde e bem-estar

Em 2011 (European Environmental Agency, 2014), a exposição ao ruído ambiente contribuiu para o aparecimento de 910 000 novos casos de hipertensão. A principal fonte foram as estradas, contribuindo para 790 000 casos (Figura 2.17).

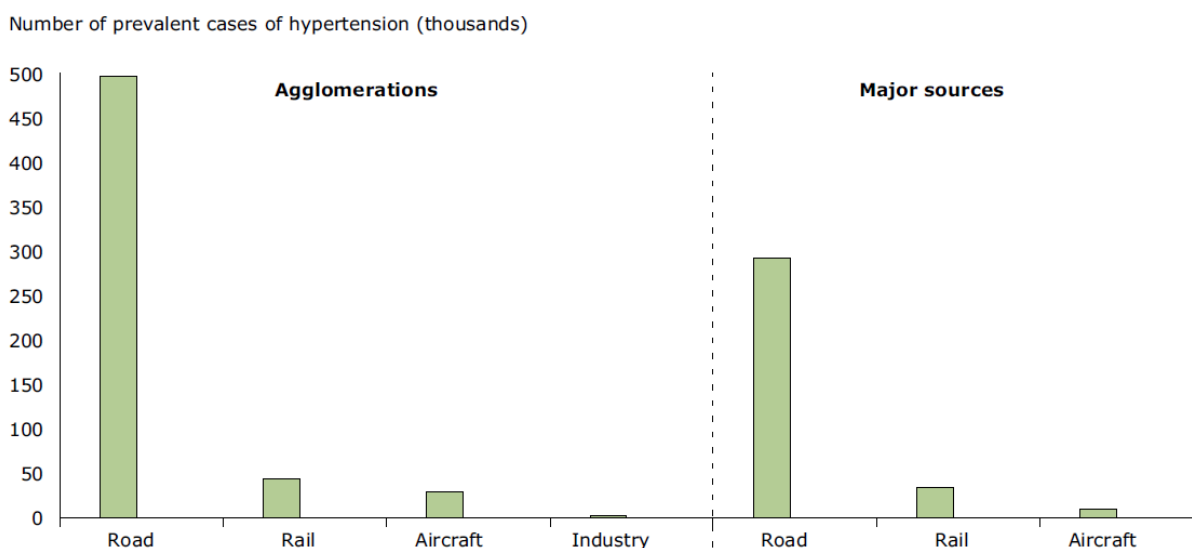


Figura 2.17. Estimativa do número de casos de hipertensão. Avaliação feita em aglomerações e perto da fonte (European Environmental Agency, 2014).

Também nas escolas perto de aeroportos, é possível contabilizar 8 000 casos de estudantes, entre 7 e 17 anos, que veem as condições de leitura condicionadas pelo ruído proveniente de tráfego aéreo e manobras em aeroportos.

Estima-se que o total de entradas em hospitais relacionadas com doenças coronárias e AVC's com origem na exposição ao ruído, seja de 43 000 por ano, quatro vezes mais do que o número de mortes prematuras. De facto, a exposição ao ruído contribui para 6 700 mortes prematuras por ano devido doenças coronárias e 3 300 devido a AVC's.

Mais uma vez, a fonte que mais contribui para estes números são as estradas, sendo que 89% das mortes registadas (10 000 por ano) são devidas a esta fonte.

À semelhança da Figura 2.16. a Figura 2.18. demonstra que a maior “fatia” de casos de mortes prematuras está relacionada com exposições a níveis de ruído entre os 65-69 dB (para aglomerações) e 60-64 dB (para estradas principais).

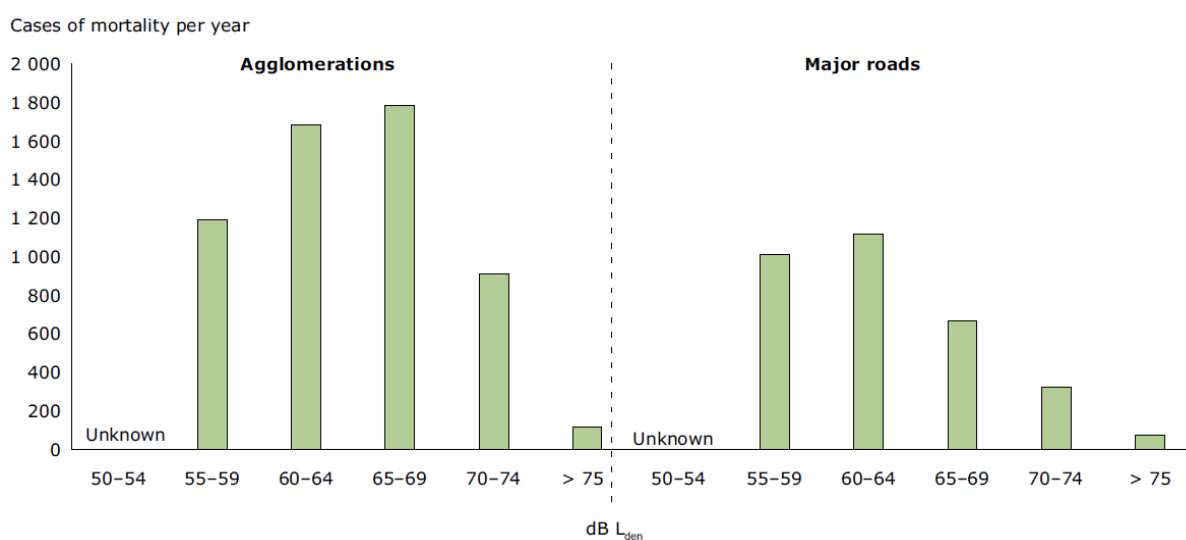


Figura 2.18. Estimativa do número de casos fatais devido à exposição ao ruído (L_{den}) provocado nas estradas. Avaliação feita em aglomerações e para as estradas principais (European Environmental Agency, 2014).

Outras doenças (SØRENSEN et al., 2013) como os diabetes ou cancro da mama, foram associadas à exposição ao ruído, o que é biologicamente plausível. Porém, tais dados precisam de confirmação antes de serem considerados válidos.

Apesar das estimativas apontarem que 90% do aparecimento de problemas de saúde causados pelo ruído se devem a ruído rodoviário, as avaliações mais recentes (de 33 países membros da União Europeia), fixam este número entre 20-35%. Dados incompletos e limitações nas

avaliações podem ser causas para esta subestimação, que não é conhecida para as outras fontes.

Os níveis de ruído que mais afetam a saúde de indivíduos situam-se entre os 60 e os 69 dB. Isto sugere que as medidas tomadas para a redução, apenas tiveram efeito em níveis altos, não sendo eficazes para níveis intermédios.

2.5 Aspetos legais

A partir dos anos 70, a União Europeia estabeleceu diretivas que limitaram a produção de poluição sonora em função do tipo de veículo. Por exemplo, para um veículo ligeiro de passageiros a produção de ruído em 1970 estava limitada a 82 dB(A). Ao longo dos anos, várias diretivas foram lançadas: em 1970 foi lançada a 70/157/EEC, em 1977 a 77/212/EEC, em 1985 a 84/424/EEC e em 1993 a 92/97/EEC. De 1993 a 1996 o valor limite para a produção de ruído através de veículos ligeiros de passageiros era de 74 dB (A).

A legislação mais recente aprovada a 21 de Março de 2014 e publicada pela OJEU (Official Journal of the European Union), indica que os valores limites vão ser reduzidos (em duas etapas) de 2 dB (A) para veículos ligeiros de passageiros, autocarros e camiões leves, e de 1 dB (A) para camiões pesados numa primeira fase e de 2 dB (A) numa segunda fase (Pereira, 2015). A primeira fase entrará em vigor em 2021 e a segunda fase em 2028.

2.5.1 Diretiva 2002/49/CE do Parlamento Europeu e do Conselho

A 25 de Junho de 2002 é aprovada a diretiva 2002/49/CE, mais conhecida como Diretiva do Ruído Ambiente (Environmental Noise Directive – END), elaborada pelo Parlamento Europeu e do Conselho, relativa à avaliação gestão do ruído ambiente.

Antes de prosseguir, importa esclarecer alguns conceitos que mais à frente vão ser introduzidos e que estão definidos (Parlamento Europeu e do Conselho, 2002) particularmente na END:

- «Aglomeração», *uma parte do território, delimitada pelo Estado-Membro, com uma população superior a 100 000 habitantes e uma densidade populacional que esse Estado-Membro considera como zona urbanizada;*
- «Grande eixo rodoviário», *uma estrada regional, nacional ou internacional, designada pelo Estado-Membro, onde se verificam mais de 3 milhões de passagens de veículos por ano;*
- «Grande eixo ferroviário», *uma via férrea, designada pelo Estado-Membro, onde se verificam mais de 30 000 passagens de comboios por ano;*

-
- «Grande aeroporto», um *aeroporto civil, designado pelo Estado-Membro, com mais de 50 000 movimentos por ano (sendo um movimento uma descolagem ou uma aterragem), com exceção dos que se destinam exclusivamente a ações de formação em aeronaves ligeiras.*

Esta diretiva deve (Parlamento Europeu e do Conselho, 2002), entre outras coisas, proporcionar uma base para desenvolver e completar o conjunto de medidas comunitárias em vigor em matéria de ruído emitido pelas principais fontes, bem como desenvolver medidas adicionais, a curto, médio e longo prazo.

Neste sentido, os Estados-Membros têm a responsabilidade de designar as autoridades e os organismos responsáveis pela aplicação da END, incluindo as autoridades responsáveis pela elaboração e, se for caso disso, aprovação dos mapas de ruído e dos planos de ação para aglomerações, grandes eixos rodoviários ou ferroviários e grandes aeroportos.

Relativamente aos mapas de ruído, a partir de 30 de Junho de 2012, de cinco em cinco anos, os Estados-Membros assegurarão (Parlamento Europeu e do Conselho, 2002) que sejam elaborados e, se for caso disso, aprovados pelas autoridades competentes mapas estratégicos de ruído relativos à situação no ano civil anterior para todas as aglomerações e para todos os grandes eixos rodoviários e ferroviários.

Estes mapas obedecem a requisitos mínimos estabelecidos no anexo IV da END.

Os aspetos que devem estar contidos no mapa, a forma de apresentação ao público, as fontes de ruído tratadas nos mapas das aglomerações, os fins dos mesmos e outras notas complementares estão contidas neste anexo.

Os Planos de ação são (Parlamento Europeu e do Conselho, 2002) *planos destinados a gerir os problemas e efeitos do ruído, incluindo a redução do ruído, se necessário.*

Até 18 de Julho de 2013, os Estados-Membros deveriam ter garantido que as autoridades competentes elaborassem os seus planos de ação, que devem ser reanalisados de cinco em cinco anos a contar da data da sua aprovação.

As medidas a aplicar no âmbito destes planos ficarão ao critério das autoridades competentes, que deverão determinar prioridades que poderão ser identificadas quando é ultrapassado qualquer valor-limite relevante, ou por outros critérios escolhidos pelos Estados-Membros (que devem ser apresentados à Comissão), e aplicar-se especialmente às áreas mais importantes estabelecidas na elaboração dos mapas estratégicos de ruído.

No anexo V, a END, define os elementos que o Plano de ação deve incluir, os elementos das ações que as autoridades pretendam desenvolver no âmbito das suas competências e outras informações complementares.

A diretiva prevê também que o público (uma ou mais pessoas coletivas – associações, organizações ou grupos) participe ativamente na preparação e revisão dos planos de ação e seja consultado sobre as propostas a aplicar.

2.5.2 Regulamento Geral do Ruído

Este regulamento inserido no Decreto-Lei n.º 9/2007, emitido a 17 de janeiro de 2007 no Diário da República Portuguesa, e elaborado pelo Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional, tem como principal objetivo (Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional, 2007) *estabelecer o regime de prevenção e controlo da poluição sonora, a salvaguarda da saúde humana e o bem-estar das populações.*

A Agência Portuguesa do Ambiente (APA), deve prestar apoio técnico às entidades que executam os mapas de ruído e planos de redução de ruído, e deve definir as diretrizes a seguir.

As câmaras municipais devem disponibilizar:

- Mapas de ruído para apoiar a elaboração, alteração e revisão dos planos diretores municipais (PDM) e dos planos de urbanização;
- Relatórios sobre recolha de dados acústicos para apoiar a elaboração, alteração e revisão dos planos de pormenor, sem prejuízo de poderem elaborar mapas de ruído sempre que tal se justifique.

Os planos municipais de ordenamento do território, tendo em consideração as fontes de ruído existentes e previstas, asseguram a qualidade do ambiente sonoro, promovendo a distribuição adequada do território. Neles são estabelecidas, pelos municípios, as classificações, delimitações e a disciplina das zonas sensíveis e zonas mistas.

No âmbito desta matéria “zona sensível” é classificada (Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional, 2007) como *a área definida em plano municipal de ordenamento do território como vocacionada para uso habitacional, ou para escolas, hospitais ou similares, ou espaços de lazer, existentes ou previstos, podendo conter pequenas unidades de comércio e de serviços destinadas a servir a população local, tais como cafés e outros estabelecimentos de restauração, papelarias e outros*

estabelecimentos de comércio tradicional, sem funcionamento no período noturno. Já a “zona mista” é classificada (Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional, 2007) como a área definida em plano municipal de ordenamento do território, cuja ocupação seja afeta a outros usos, existentes ou previstos, para além dos referidos na definição de zona sensível.

Sempre que uma zona sensível ou mista ultrapassar os valores limites fixados de ruído (L_{den} e L_n), deve ser objeto de um plano municipal de redução de ruído, cuja elaboração é da responsabilidade das câmaras municipais.

Estes valores limites são estabelecidos no artigo 11º do RGR e estão sintetizados no Quadro 2.2.

Quadro 2.2. Valores limites de exposição das zonas (Artigo 11º do RGR)

Classificação da zona		L_{den} máximo	L_n máximo
Zona Sensível		55 dB(A)	45 dB(A)
Zona Sensível	Na proximidade de uma grande infraestrutura de transporte existente à data de entrada em vigor do RGR	65 dB(A)	55 dB(A)
	Na proximidade de uma grande infraestrutura de transporte aéreo, projetada até à data de elaboração ou revisão do plano municipal de ordenamento do território	65 dB(A)	55 dB(A)
	Na proximidade de uma grande infraestrutura de transporte não aéreo, projetada até à data de elaboração ou revisão do plano municipal de ordenamento do território	60 dB(A)	50 dB(A)
Zona Mista		65 dB(A)	55 dB(A)
Até à classificação das zonas		63 dB(A)	53 dB(A)

Nos termos do RGR, “infraestrutura de transporte” é a *instalação e meios destinados ao funcionamento de transporte aéreo, ferroviário ou rodoviário.*

As infraestruturas de transporte, novas ou em exploração, estão sujeitas aos valores limites supra referidos. Para tal cumprimento, o RGR aconselha, no artigo 19º, que se adotem medidas necessárias com a seguinte ordem decrescente:

- Medidas de redução na fonte de ruído;
- Medidas de redução no meio de propagação de ruído.

“Grande infraestrutura de transporte aéreo” é definido como sendo *o aeroporto civil identificado como tal pelo Instituto Nacional de Aviação Civil cujo tráfego seja superior a 50*

000 movimentos por ano de aviões civis subsónicos de propulsão por reação, tendo em conta a média dos três últimos anos que tenham precedido a aplicação das disposições deste diploma ao aeroporto em questão, considerando-se um movimento uma aterragem ou uma Descolagem.

“Grande infraestrutura de transporte ferroviário” é o troço ou conjunto de troços de uma via férrea regional, nacional ou internacional identificada como tal pelo Instituto Nacional do Transporte Ferroviário, onde se verifique mais de 30 000 passagens de comboios por ano.

“Grande infraestrutura de transporte rodoviário” é o troço ou conjunto de troços de uma estrada municipal, regional, nacional ou internacional identificada como tal pela Estradas de Portugal, E. P. E., onde se verifique mais de três milhões de passagens de veículos por ano.

Por fim, as grandes infraestruturas de transporte aéreo, ferroviário e rodoviário elaboram mapas estratégicos de ruído e planos de ação com base no disposto no Decreto-Lei n.º 146/2006, de 31 de julho.

2.5.3 Decreto-Lei n.º 146/2006

O DL n.º 146/2006 transpõe (Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional, 2006) a Diretiva Europeia, 2002/49/CE – END, para a ordem jurídica interna, estabelecendo um regime especial para a elaboração de mapas estratégicos de ruído, impondo a obrigação de recolha e de disponibilização de informação ao público relativa aos níveis de ruído ambiente sob a forma de mapas estratégicos de ruído, de acordo com critérios definidos ao nível comunitário, e a utilização de indicadores e métodos de avaliação harmonizados, bem como para os planos de ação.

Essa obrigação recai sobre as grandes infraestruturas de transporte rodoviário, ferroviário e aéreo, e as aglomerações de maior expressão populacional.

Os mapas estratégicos de ruído são elaborados para os indicadores L_{den} e L_n , determinados através de métodos provisórios de cálculo: para ruído industrial – NP 4361-2:2001, cujos dados obtidos são medidos de acordo com ISO 8297:1994, NP EN ISO 3744:1999 e EN ISO 3746:1995; para o ruído das aeronaves - ECAC.CEAC Doc. 29, utilizando a técnica de segmentação contida na secção 7.5 do Doc. 29 da ECAC.CEAC, para conceção de rotas de voo; para o ruído do tráfego rodoviário – método de cálculo francês NMPB-Routes-96 (SETRA-CERTU--LCPC-CSTB) e norma francesa XPS 31-133; para o ruído do tráfego ferroviário – método de cálculo nacional Standaard-Rekenmethode II dos Países Baixos.

O método provisório de medição dos indicadores (L_{den} e L_n), tem por base a definição dos indicadores e os procedimentos descritos na série NP ISO 1996:2011 parte 1 e 2, “Descrição, Medição e Avaliação do Ruído Ambiente”.

Os mapas de ruído podem ser referentes a uma situação acústica existente ou prevista em função de um indicador de ruído e devem conter a informação da ultrapassagem de qualquer valor limite em vigor, o número estimado de pessoas afetadas e de habitações expostas a determinados valores de um indicador de ruído em determinada zona.

A sua aprovação é feita pela Agência Portuguesa do Ambiente (APA).

Os planos de ação devem conter (Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional, 2006):

- Uma descrição da aglomeração, das grandes infraestruturas de transporte rodoviário, ferroviário e aéreo;
- A entidade competente pela elaboração do plano;
- As entidades competentes pela execução das eventuais medidas de redução de ruído e das ações previstas;
- O enquadramento jurídico;
- Os valores limites existentes no RGR;
- Um resumo dos dados que lhes dão origem, os quais se baseiam nos resultados dos mapas estratégicos de ruído;
- Uma avaliação do número estimado de pessoas expostas ao ruído, identificação de problemas e situações que necessitem de ser corrigidas;
- Um registo das consultas públicas, organizadas de acordo com a legislação aplicável;
- Eventuais medidas de redução do ruído já em vigor e projetos em curso;
- Ações previstas pelas entidades competentes para os cinco anos seguintes, incluindo quaisquer ações para a preservação de zonas tranquilas;
- Estratégia a longo prazo;
- Informações financeiras (se disponíveis): orçamentos, avaliação custo-eficácia e avaliação custo-benefício;
- Medidas previstas para avaliar a implementação e os resultados do plano de ação;
- Estimativas em termos de redução do número de pessoas afetadas (incomodadas, que sofram de perturbações do sono ou outras).

Em 2006 e 2011, estavam previstas duas fases distintas de entrega de planos de ação ao IA, sob condições diferentes para envolventes de grandes infraestruturas de transporte rodoviário, ferroviário e aéreo, bem como para aglomerações. O artigo 10º especifica estas condições.

Os mapas estratégicos de ruído e os planos de ação (Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional, 2006) são reavaliados e alterados de cinco em cinco anos a contar da data da sua elaboração ou sempre que se verifique uma alteração significativa relativa a fontes sonoras ou à expansão urbana com efeitos no ruído ambiente.

Estes dois elementos devem ser divulgados ao público, através das tecnologias de informação eletrónica. O plano de ação está sujeito a uma consulta pública que não pode ser inferior a 30 dias e deve ocorrer antes da aprovação do plano.

O IA, é a instituição que tem a competência de enviar à Comissão Europeia, informações necessárias sobre grandes infraestruturas de transporte rodoviário, ferroviário, aéreo e aglomerações, bem como a listagem das entidades competentes para a elaboração, aprovação e recolha dos respetivos mapas estratégicos de ruído e planos de ação.

Por fim, é de referir que o DL 146/2006 não prejudica o Regulamento Geral de Ruído.

3 ESTRATÉGIAS DE MITIGAÇÃO

O tratamento do ruído pode ser executado na fonte emissora, no meio de transmissão ou no recetor. De seguida, far-se-á uma exposição de estratégias para reduzir o ruído na fonte emissora e no meio de transmissão, apresentando soluções tradicionais, inovadoras e ecológicas.

3.1 Introdução

As propriedades acústicas do ar dependem (HOSANNA partners, 2013) de características meteorológicas, como a velocidade do vento e a temperatura do mesmo, a humidade ou a pressão atmosférica. O grau de difração das ondas sonoras e a sua direção de propagação, estão relacionados com a velocidade do vento e com a sua direção, respetivamente, e a altura a que se propagam, com a temperatura. De facto, uma variação descendente do vento ou uma variação brusca da temperatura pode originar subidas substanciais dos níveis de ruído junto ao recetor.

A minimização do ruído no meio de propagação pode ser feita através de edificação de barreiras e alterando a envolvente das zonas de emissão de ruído. A escolha dos materiais, a sua geometria e a distância da barreira à fonte, podem ser cruciais para a eficácia da solução.

É importante apresentar configurações de estratégias de mitigação inteligentes e ecológicas que atuem no meio de transmissão como, por exemplo, a colocação de árvores atrás das barreiras acústicas, com intenção de atenuar possíveis difrações descendentes ou outras como cristais sónicos que criam uma difração ascendente das ondas sonoras.

Em terreno plano, o som que atinge o recetor é a interação entre o som que é diretamente emitido da fonte e a reflexão do mesmo feita pelo terreno, que se designa como efeito do terreno. Para algumas frequências, a combinação entre o som direto e refletido podem reduzir a intensidade sonora, trabalhando o solo como um atenuador de ruído. Para outras frequências, a combinação das duas ondas sonoras produz o efeito contrário, intensificando o nível sonoro.

Faz então todo o sentido, existir como estratégia de mitigação, o tratamento do terreno que rodeia o emissor, podendo haver colocação de soluções, como relvados, ou tratamento do próprio pavimento.

Algumas das soluções apresentadas nesta dissertação baseiam-se na revisão de um projeto chamado HOSANNA. O projeto HOSANNA (HOListic and Sustainable Abatement of Noise by optimized combinations of Natural and Artificial means), levado a cabo por 13 entidades colaboradoras de vários países, reúne soluções que ajudam a reduzir o ruído ferroviário e rodoviário, otimizando soluções naturais (vegetação, solo) e recicladas, com a adição de outros elementos artificiais.

3.2 Barreiras inovadoras e ecológicas

As barreiras acústicas tradicionais são feitas (HOSANNA partners, 2013) de madeira, metal ou betão armado. Porém, materiais alternativos e mais sustentáveis, podem trazer tanto benefícios económicos como estéticos e ser mais eficazes na redução do ruído do que as barreiras tradicionais, integrando materiais reciclados vindos de indústrias locais ou materiais naturais como pedra, solo ou vegetação.

3.2.1 Barreiras feitas com materiais reciclados

Este tipo de barreiras integra, frequentemente, betão reforçado com fibras de madeira, granulados de borracha proveniente de pneus, tábuas de madeira recicladas ou uma combinação de desperdícios de PVC com lã mineral porosa.

A percentagem de material reciclado que integra a barreira, a sua origem e peso, são fatores importantes na conceção deste tipo de barreira, influenciando, por exemplo, o custo de produção ou a pegada ecológica da barreira.

Por forma, a reduzir os impactes no ambiente, o projeto HOSANNA, desenvolveu um novo processo de arrefecimento que produz material altamente poroso com uma distribuição e tamanho dos poros controlados, influenciando diretamente o peso da barreira. Este material é produzido a partir de um granulado de desperdícios de plásticos e de borracha, cuja fonte pode ser a indústria da construção, unidades fabris e a própria comunidade local.

O desempenho acústico de barreiras feitas a partir da reconstituição de granulados de desperdícios, depende do rácio grãos/fibras, tipo de adesivo e outros aditivos químicos utilizados no processo de consolidação.

De seguida apresentam-se duas soluções onde se pode aplicar este material reciclado.

Na Figura 3.1. é apresentado um material que pode ser utilizado em barreiras acústicas e permite fazer a retenção do solo em barreiras acústicas vegetais. Os materiais (a) e (b) são ambos de baixa densidade, sendo que o (a) é feito a partir de desperdícios e o (b) é um solo.



Figura 3.1. Material reciclado utilizado no aumento da absorção sonora e retenção de solo em barreiras acústicas vegetais (HOSANNA partners, 2013)

A Figura 3.2. expõe a configuração de uma barreira de alta densidade. O material (a) é feito de desperdícios e é de alta densidade enquanto o (b) é um solo de baixa densidade, constituindo assim (a+b), um painel de alta densidade que pode ser posicionado atrás de um solo de baixa densidade.

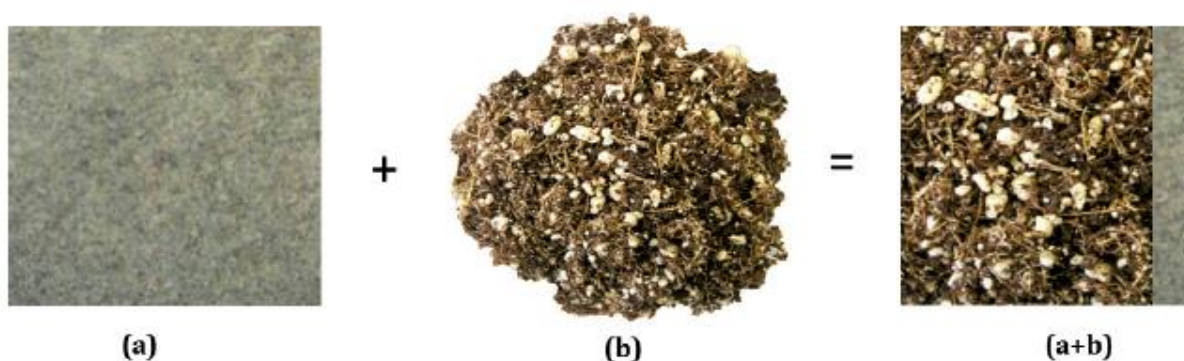


Figura 3.2. Material reciclado utilizado para promover atenuação sonora e retenção do solo em barreiras acústicas vegetais (HOSANNA partners, 2013)

Se a aplicação for isolamento sonoro, é recomendado (HOSANNA partners, 2013) um material com uma porosidade relativamente baixa, uma densidade relativamente alta e um grau de amortecimento relativamente alto (Figura 3.2.).

Os materiais absorventes porosos tradicionais não são eficazes para baixas frequências, pois na presença de ondas sonoras com comprimento de onda superior à espessura da camada porosa, deixam-se atravessar.

Para colmatar esta falha, é comum combinarem-se várias camadas de materiais homogêneos, de modo a formar uma estrutura porosa.

Para evitar reflexões, o absorvente acústico poroso deve ter uma impedância próxima da do ar e oferecer uma atenuação acústica interna. Estas duas exigências são difíceis de alcançar em materiais homogêneos, sendo mais facilmente alcançadas em materiais estratificados.

No projeto HOSANNA foram produzidas amostras que conjugavam plásticos reciclados com uma camada de material poroso, conseguindo uma redução sonora de 20 a 40% quando comparada com os materiais porosos tradicionalmente utilizados.

3.2.2 Barreiras acústicas verticais que integrem sistemas de plantas e solo

As pesquisas feitas no projeto HOSANNA, sugerem que a capacidade de absorção acústica de um solo é maioritariamente influenciada pela sua densidade e sua humidade. Um solo de baixa densidade (como é o caso de um solo orgânico), testado no projeto, registou um coeficiente de absorção acústico, dependente da frequência, semelhante ao de uma camada de fibra de vidro com uma espessura equivalente.

A presença de folhas, cobrindo a maior parte da área do painel, pode melhorar bastante a absorção acústica quando introduzidas em barreiras vegetativas com solos densos, sendo eficaz para uma grande gama de frequências.

De facto, o aumento de absorção é condicionado pelo tipo de planta, ângulo da folha, densidade da folhagem e área total de folhas numa unidade de volume. O coeficiente de absorção acústico de uma planta com uma folha de grande área, é menos dependente da frequência, caso seja colocada num solo de baixa densidade.

Uma parede verde com um solo de baixa densidade é, então, uma boa alternativa às soluções convencionais, particularmente para tratamento acústico de altas e baixas frequências.

O princípio construtivo está demonstrado na Figura 3.3.. O painel fabricado a partir de desperdícios (de têxteis, da construção e da indústria da manufatura), que alberga um meio poroso granular e as suas plantas, promove a absorção acústica, retenção de líquidos e altera o ambiente do local, devido à transpiração das plantas.



Figura 3.3. Princípio construtivo e aplicação (nas proximidades de um edifício histórico)
(HOSANNA partners, 2013)

3.2.3 Barreiras de baixa altura

Este é um tipo de barreira que não excede 1 metro em altura e espessura, e é usada em zonas urbanas movimentadas, para proteger passeios e bancos de jardim do ruído proveniente de estradas e caminhos de ferro.

Foram estudadas (HOSANNA partners, 2013) diferentes configurações deste tipo de barreiras, algumas utilizando gabiões ou vegetação, e demonstrado que quando bem localizadas e desenhadas, estas barreiras podem desempenhar um papel importante na proteção de peões, ciclistas e residentes, contra o ruído produzido numa certa zona. Uma possível localização é em zonas centrais da cidade, onde é imposto um limite de velocidade.

Uma barreira deste tipo com 1 metro de altura e 40 centímetros de espessura, cuja composição é uma mistura de fibras naturais, minerais e um núcleo rígido, instalada ao longo de uma estrada com duas vias, pode reduzir o ruído, nos 2 a 50 metros atrás da barreira e 1 a 5 metros verticalmente, em 9 dB(A).

A eficácia desta solução pode diminuir em ruas com edifícios altos, e aumentar caso se adicione uma segunda barreira entre as faixas de rodagem.

Por exemplo, numa linha de elétrico, a adição de uma barreira central aumenta a redução sonora em 8 dB(A).

Para um muro de gabiões de 1 metro de altura, feito de rochas com 15 a 20 centímetros, a atenuação sonora é de 3-8 dB(A). Se se substituir as rochas por argila porosa, obtém-se uma eficácia superior (Figura 3.4.).

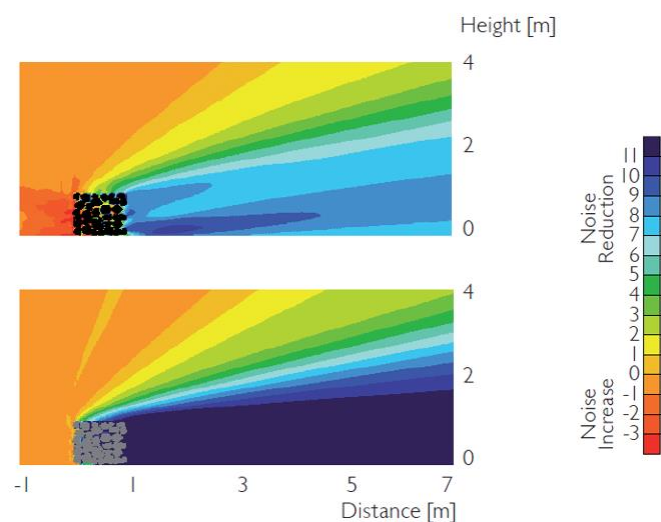


Figura 3.4. Redução sonora (comparada com a mesma situação, mas sem barreira) por parte de um muro de gabiões com 1 metro de altura e espessura, feito de pedras com 15 a 20 centímetros (topo) e argila porosa (fundo), no caso de uma estrada com duas vias (HOSANNA partners, 2013)

Já numa linha de elétrico de duas faixas, sem tratamento acústico, uma barreira de baixa altura combinada com cristais sónicos, cilindros ocios verticais (ver definição detalhada em 3.2.5.), pode exercer uma redução de ruído até 10 dB(A). Se se cobrir a superfície dos cilindros com uma camada de 2 centímetros de betão de cânhamo, a redução sonora aumenta mais 7 dB(A).

A Figura 3.5. retrata o aumento da redução sonora introduzido por bermas de terra de baixa altura com formato em escada, na passagem de um comboio de alta velocidade e numa autoestrada, em dois tipos de geometria de terreno: com e sem presença de talude.

Uma berma em talude, com 4 metros de altura, pode introduzir uma redução sonora de 7 dB(A), comparando com uma situação sem tratamento, num recetor a 2 a 50 metros da barreira e 2 a 10 metros de altura no caso de um caminho de ferro e 2 a 5 metros no caso de uma autoestrada.

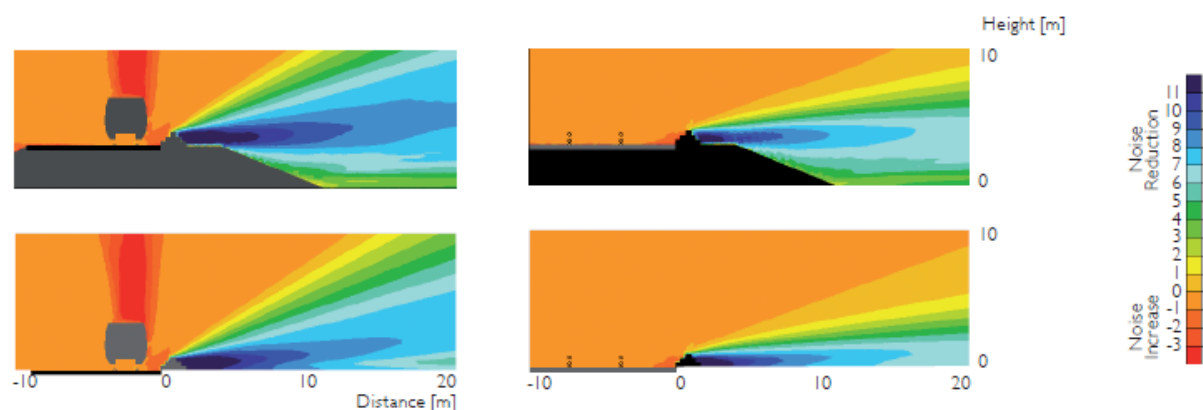


Figura 3.5. Comportamento de uma barreira de terra de baixa altura, colocada numa autoestrada (esquerda) e num caminho de ferro (direita), introduzida num terreno em talude com 4 metros de altura (cima) e num terreno plano (baixo) (HOSANNA partners, 2013)

Em pontes onde existe circulação de tráfego e abaixo das quais circulam peões ou ciclistas, a proteção dos transeuntes pode ser feita introduzindo barreiras baixa altura.

Rígidas e finas, normalmente com 1 metro de altura, posicionam-se junto às arestas da parte superior das pontes, por forma a proteger os pedestres e ciclistas que circulam abaixo da mesma (Figura 3.6.).



Figura 3.6. Barreiras de pequena dimensão cobertas de vegetação numa ponte (HOSANNA partners, 2013)

No caso de uma autoestrada de quatro vias, uma barreira com 1 metro de altura pode reduzir os níveis de ruído no recetor, abaixo do viaduto, até 4 dB(A), e até 10 dB (A) no caso de uma linha de elétrico com duas vias.

Numa barreira com um núcleo rígido coberto com material fino constituído por fibras e minerais, a redução sonora pode atingir os 5 dB(A) para as autoestradas e 15 dB(A) para a linha de eléctrico. Esta diferença de valores, deve-se essencialmente à absorção do ruído que é refletido entre o eléctrico e a barreira aquando da sua passagem.

3.2.4 Aplicação de acessório em vegetação

As barreiras acústicas, podem melhorar a sua eficácia se for colocada no seu topo vegetação, que é designada como o “chapéu” da barreira (Figura 3.7.).

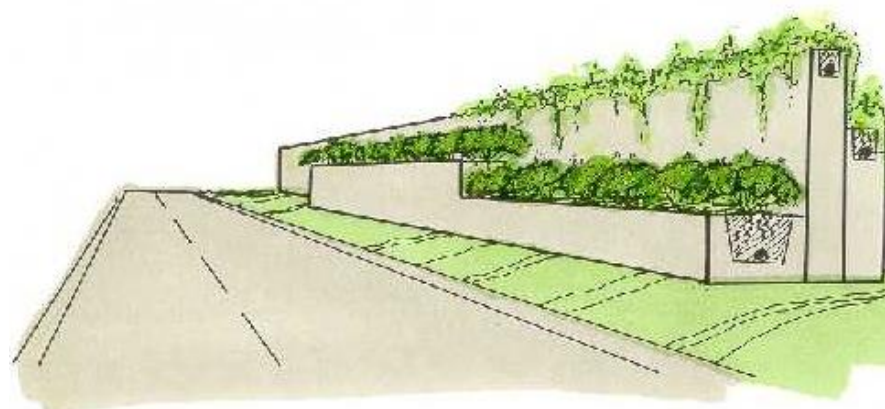


Figura 3.7. “Chapéu” em vegetação (www4.uwm.edu/cuts/noise/noiseb.htm)

Para um “chapéu” com 1 metro de espessura, a redução sonora registada a 1 metro da barreira é de 8 a 12 dB(A), comparando com uma barreira do mesmo tipo e desprovida de “chapéu” (HOSANNA partners, 2013).

3.2.5 Cristais sónicos

Cristais sónicos são cilindros dispostos verticalmente e espaçados heterogeneamente uns dos outros, criando uma barreira acústica, que apesar de ter vista livre entre os cilindros, permite atenuar o ruído gerado (Figura 3.8.).



Figura 3.8. Cristais sónicos (<http://portalacustica.info/cristais-sonicos/>)

As ondas sonoras, ao embaterem no conjunto de cilindros, sofrem fenómenos de difração e reflexão, que são induzidos por uma disposição planeada que tem o objetivo de reduzir o aumento dos níveis sonoros devido à reflexão dentro da rodovia e proteger a população localizada fora da rodovia.

Os GRIN SC (“Refractive graded-index sonic crystal noise barriers”) são (HOSANNA partners, 2013) uma classe de cristais sónicos com cilindros posicionados paralelamente ao solo. Fazendo variar espacialmente as propriedades da barreira, como por exemplo, a rigidez dos cilindros, é possível direcionar as ondas sonoras para cima (Figura 3.9).

Parâmetros como o raio do cilindro, o espaço entre eles ou o tipo de configuração da barreira, podem influenciar a eficácia da barreira. Um dos benefícios deste tipo de barreira é, para a gama de frequências escolhidas, o baixo grau de reflexão (i.e. a energia refletida na direção da fonte) comparado com as barreiras tradicionais.

Uma das condicionantes é a eficácia da barreira ser função da frequência. O facto de serem estruturas exclusivamente refratoras, obriga a que a redução sonora esteja dependente de fatores físicos que quando combinados podem ou não resultar numa barreira eficaz.

Um grupo de cristais sónicos GRIN SC com um metro de altura, disposto numa estrada com duas vias, pode reduzir, num recetor distanciado horizontalmente a 15 metros, 4 dB (A) (Figura 3.9.).

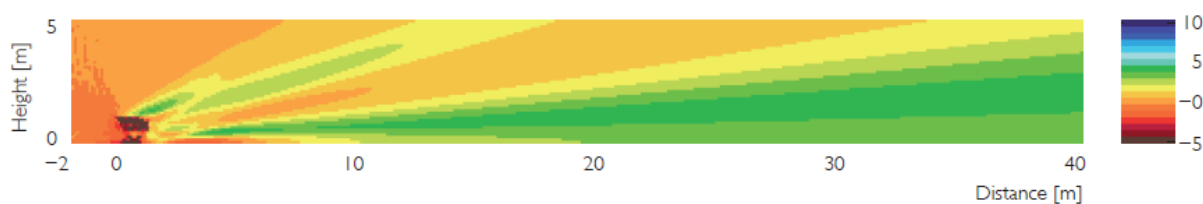


Figura 3.9. Redução sonora introduzida por GRIN SC de 1m^2 de secção transversal, medida a 1 metro de altura, numa estrada onde circulam veículos ligeiros a uma velocidade média de 50 km/h (HOSANNA partners, 2013)

3.2.6 Bermas de terra

Apesar de este tipo de bermas necessitar de mais espaço, a sua versatilidade, a estética, a sensação de abertura que transmitem e a possibilidade de serem plantadas, colmatam esta desvantagem. São vantajosas, pois têm um longo período de vida, não necessitam de muito investimento na manutenção e dificilmente serão vandalizadas com grafitis. Para além disso, poderão ser constituídas de materiais em excesso noutras atividade, tal como, solo e rochas resultantes de escavações.

Outra vantagem neste tipo de bermas é a sua interação com ventos baixos (que transportam o ruído da fonte para o recetor). Se se diminuir a inclinação das bermas é possível reduzir o efeito do vento. É estimado (HOSANNA partners, 2013) que para bermas de terra com 18° de inclinação, ou para encostas íngremes com um topo plano, o efeito do vento agrava apenas entre 1 a 2 dB(A) o ruído que chega ao recetor.

O talude destas soluções pode ser liso ou com relevo (por exemplo em escada). Estima-se que bermas com taludes com relevo sejam mais eficazes do que bermas com taludes lisos. Por exemplo, uma berma em escada pode reduzir mais 4 dB(A), quando comparada com uma berma de talude liso, com 4 metros de altura (Figura 3.10.).



Figura 3.10. Berma de terra com talude em escada (HOSANNA partners, 2013)

3.2.7 Árvores, arbustos e sebes

Na interação do som com a vegetação a redução de ruído pode ser feita de duas maneiras: o som pode ser redirecionado através da reflexão, refração ou dispersão, ou então pode ser absorvido.

As folhas vibram a uma frequência perto dos 2-4 kHz. Para estas frequências podem ser medidos grandes níveis de pressões sonoras na parte superior da folha. Em condições de laboratório, conclui-se que as características que levam a maior redução de ruído são a densidade de área e o tamanho e peso da folha. Também a orientação da folha desempenha um papel importante.

Em ruas delimitadas à esquerda e à direita por edifícios altos (canions urbanos), as reflexões que se dão entre as fachadas dos edifícios, aumentam muito o nível sonoro da rua. A existência de árvores perto da fonte, portanto, na rua, contribui para a dispersão de ruído.

A reverberação, neste caso, ocorre dentro da copa da árvore, sendo que a energia dissipada é função do tempo de permanência na copa, já que é lá que ocorrem as reflexões múltiplas de energia por parte de folhas, ramos e galhos.

Resultados de experiências feitas no terreno, concluíram que a reverberação exercida por árvores de folha caduca só é relevante para frequências acima de 1 kHz. Para 4kHz, por exemplo, o tempo de reverberação é de 0,34 segundos, e este tempo aumenta se o tamanho da copa aumentar. É expectável que a redução de ruído introduzida por esta solução não passe de 2 dB(A).

Nas estradas em campo aberto, vários aglomerados de árvores podem ajudar a reduzir o nível de ruído. Se a estes sistemas estiverem associados solos macios ou vegetação rasteira, é possível aumentar a redução.

Por outro lado, as copas das árvores podem ter um efeito negativo quando tanto a fonte como o recetor se localizam abaixo dela, como é o caso de uma estrada circundada por árvores. A dispersão descendente efetuada pela copa e a reflexão descendente que ocorre no topo da mesma, são dois efeitos que se tornam importantes para altas frequências.

Durante o atravessamento de um campo sonoro por um aglomerado de árvores foram recolhidas 3 fotos instantâneas em diferentes momentos, por forma a analisar a interação entre o campo sonoro e as diferentes partes do sistema (Figura 3.11.).

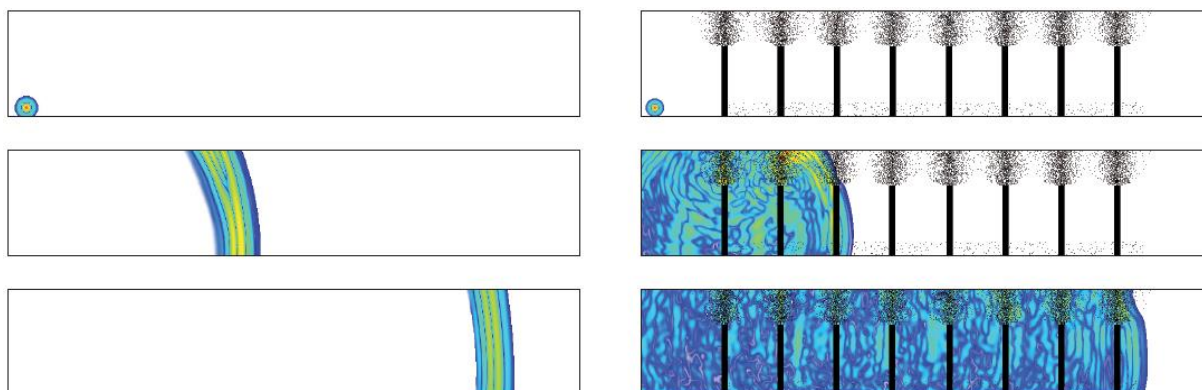


Figura 3.11. Propagação de um pulso ao longo de um aglomerado de árvores (HOSANNA partners, 2013)

As zonas laranja e amarela indicam níveis de pressão sonora altos, a verde associam-se níveis intermédios e a azul níveis baixos. As reflexões múltiplas que ocorrem ao longo do aglomerado de árvores são bem visíveis na Figura 3.11. e são superiores na zona inferior do sistema.

Existem alguns parâmetros importantes quando se projeta este tipo de sistemas, são eles: espaçamento entre árvores, diâmetro do tronco, comprimento e largura do aglomerado de árvores, o esquema de plantação, densidade da biomassa utilizada e altura da árvore, que a partir de 2 metros de altura deixa de ser um parâmetro relevante.

O parâmetro chave é o espaçamento entre árvores, que deve ser o menor possível. Também pequenos desvios no alinhamento ou variações do diâmetro dos troncos podem levar a uma maior redução de ruído. As espécies escolhidas devem conseguir desenvolver copas densas e troncos largos. A introdução de zonas abertas (i.e., intervalos entre árvores), em aglomerados de árvores, não afeta o desempenho da barreira, desde que não sejam posicionadas perto das bermas.

Para uma estrada com duas vias de circulação, faz-se o registo do nível sonoro com e sem o aglomerado de árvores. O sistema com 25 metros de largura e 75 metros de comprimento, é plantado junto à borda da estrada, com uma ligeira desordem no alinhamento e com um espaçamento de 1 metro entre árvores cujo tronco tem 16 centímetros de diâmetro. Tal configuração levou a uma diminuição de ruído de 7 dB(A) (Figura 3.12.).

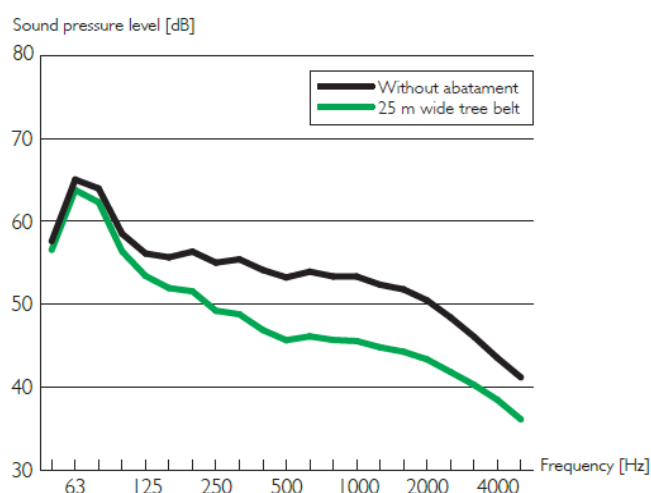


Figura 3.12. Efeito que um aglomerado de árvores tem no nível de ruído registado a 40 metros de distância e proveniente de uma estrada com duas vias cuja velocidade média de circulação é 50 km/h, feita por 95% de ligeiros e 5% de pesados (HOSANNA partners, 2013)

É estimado que um aglomerado de árvores ao longo de uma estrada, introduza uma redução sonora de 5-6 dB(A), que é equivalente a uma barreira de betão armado de 1 a 1,5 metros de altura, posicionada ao lado da estrada.

Também se pode optar por plantar árvores junto de barreiras acústicas, de forma a controlar a interação com os ventos e assim aumentar a performance acústica do sistema (Figura 3.13.).



Figura 3.13. Árvores para melhorar a performance acústica de barreiras (HOSANNA partners, 2013)

Uma zona de vegetação com largura de 50 metros, pode limitar significativamente a inversão de temperatura terrestre que ocorre durante a noite. Esta inversão de temperatura, a baixas

alturas, pode aumentar os níveis de ruído de uma estrada “atraindo” as ondas sonoras de volta para a estrada.

O vento afeta negativamente esta resistência, nomeadamente, atrás de objetos não aerodinâmicos como uma fila de casas ou uma barreira acústica. Esta perda de resistência devido a fenómenos refratores pode ser dramática especialmente quando os ventos se deslocam a grandes velocidades, atingindo recetores no seu caminho.

Este efeito ocorre imediatamente atrás de uma barreira, na zona onde seria esperada uma resistência alta. Como as copas das árvores fornecem uma “capa de proteção” contra o ruído, colocar árvores imediatamente atrás de barreiras acústicas, ajuda a reduzir este efeito negativo do vento.

Foi testada esta solução (Figura 3.14.), numa autoestrada com 4 faixas de rodagem, onde a circulação era feita por 85% de ligeiros e 15% de pesados, que viajavam a uma velocidade média de 100 km/h. O recetor está a 1,5 metros de altura e contra o vento. Foram feitas recolhas para 3 situações: sem tratamento acústico (preto), com barreira de 4 metros de altura perto da autoestrada (cinza) e um aglomerado denso de árvores posicionado atrás da barreira (verde). As copas das árvores excedem 8 metros o topo da barreira. É deixada uma abertura de 1 metro entre o topo da barreira e as árvores, o que beneficia a resistência ao ruído. É estimado que a barreira trabalhando isoladamente atenua 9 dB(A) e a barreira+árvores atenua 13 dB(A).

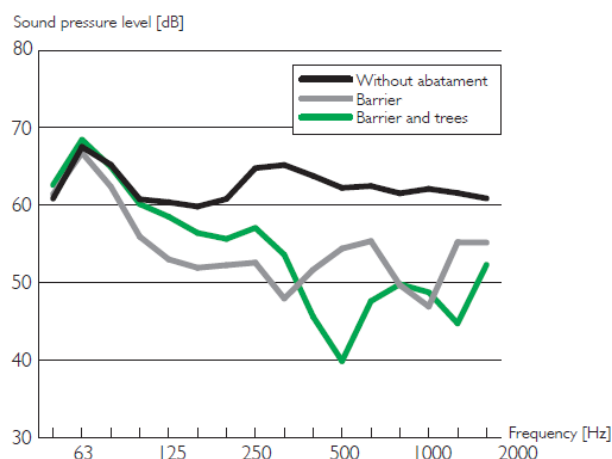


Figura 3.14. Efeitos do ruído proveniente uma autoestrada, sem tratamento do ruído, com barreira e com barreira+árvores (HOSANNA partners, 2013)

Em alguns intervalos de frequências, é possível que a solução barreira+árvores seja uma solução pior do que apenas a barreira. Tal deve-se a súbitas mudanças da direção do vento, que melhoram ou agravam a eficácia da solução.

Esta solução pode também não gerar os resultados esperados quando se conjugam árvores e bermas inclinadas.

Os arbustos quando trabalham isolados, não são soluções eficazes. Porém, em conjunto com outros sistemas, como aglomerados de árvores, podem introduzir melhorias significativas na redução do ruído. O uso de arbustos e sebes para um tratamento acústico significativo requer biomassa superficial de alta densidade.

As sebes podem reduzir o ruído proveniente de tráfego rodoviário em 1 até 3 dB(A). Devem ser finas e muito densas (internamente). A sua vegetação deve-se aproximar o mais possível do solo. Esta característica é aconselhada para evitar que o ruído se propague por baixo da sebe e torna-se especialmente importante em casos em que o ruído de rolamento gerado junto ao pavimento é significativo.

3.3 Tratamento de pavimentos rodoviários

3.3.1 Interação pneu-pavimento

A geração de ruído por parte da interação do pneu com o pavimento, engloba diversos processos físicos, que se traduzem em última instância, na geração de ruído.

O contacto entre o rasto dos pneus e a superfície do pavimento, gera vibrações radiais (mecanismo gerado por impacto) e tangenciais (mecanismo gerado pela aderência) (Figura 3.15.).

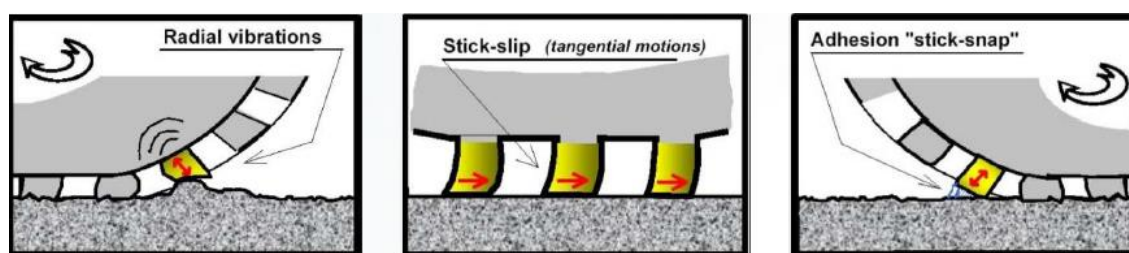


Figura 3.15. Mecanismos vibracionais que ocorrem entre o pneu e o pavimento: vibrações radiais (esquerda) e tangenciais (meio), e adesão pneu-pavimento (direita) (Tire-Road Noise Reference Book)

Também na própria carcaça do pneu são geradas vibrações, tanto na lateral do pneu como na banda de rolamento (Figura 3.16.).

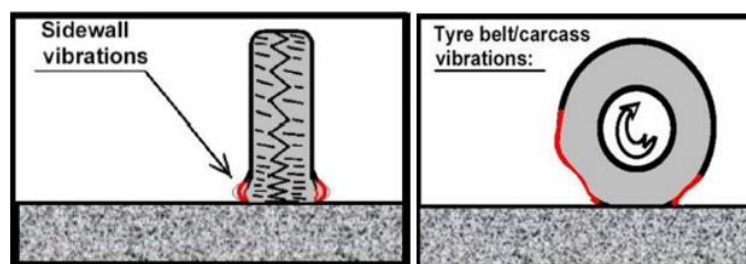


Figura 3.16. Vibrações na carcaça do pneu: vibrações laterais (esquerda) e na carcaça (direita) (Tire-Road Noise Reference Book)

A massa de ar que interage com o rasto do pneu e a superfície do pavimento, gera ruído devido à aerodinâmica (Figura 3.17.).

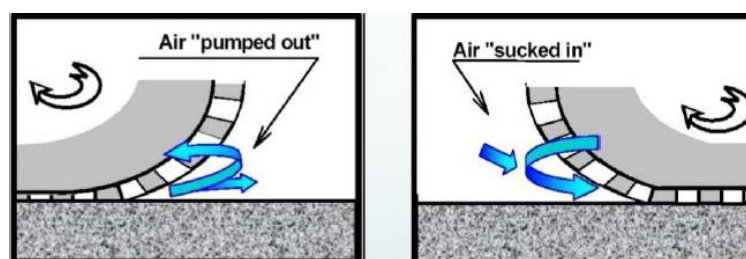


Figura 3.17. Processos aerodinâmicos na interação pneu-pavimento: ar projetado (esquerda) e ar sugado (direita) (Tire-Road Noise Reference Book)

Existem ainda diversos mecanismos de amplificação e ressonância.

Horn effect (Figura 3.18.) é um mecanismo de reorientação e amplificação da energia sonora, funcionando o rasto do pneu e o próprio pavimento como um espelho.

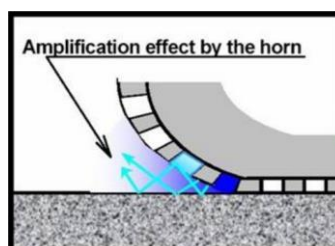


Figura 3.18. *Horn effect* (Tire-Road Noise Reference Book)

O contacto entre o pavimento e as extremidades do pneu formam ressonâncias que intensificam a geração de energia sonora.

A ressonância de Helmholtz (Figura 3.19.), ocorre quando um certo volume de ar, condensado na cavidade do rasto do pneu, é libertado, produzindo um som semelhante ao assobio gerado quando se sopra a cavidade de uma garrafa vazia.

A ressonância em tubo (Pipe Resonance) (Figura 3.19.) é gerada pelas ondas sonoras que permanecem nos sulcos do pneu e que são libertadas nas extremidades dos sulcos.

Também o ar contido no interior da câmara do pneu, quando excitado na sua frequência natural, pode provocar ressonâncias (Figura 3.19.).

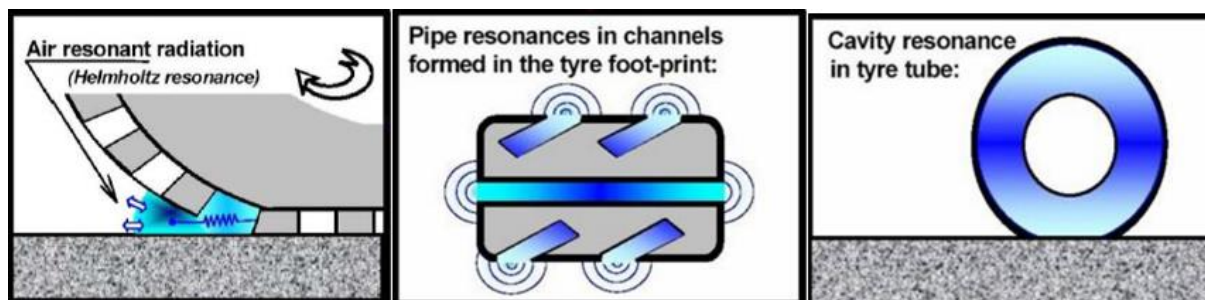


Figura 3.19. Ressonâncias provocadas na interação pneu-pavimento: ressonância de Helmholtz (esquerda), Ressonância em tubo – Pipe Resonance (meio) e ressonância devido ao ar retido na câmara de ar (direita) (Tire-Road Noise Reference Book)

3.3.2 Tratamento do pavimento

A textura do pavimento de uma estrada é definida como sendo o desvio relativamente a uma superfície plana de referência, definida na EN ISO 13473-1 (Caraterização da textura do pavimento usando perfis de superfícies).

Diferentes tipos de pavimento, com texturas diferentes, produzem então, diferentes níveis de ruído. Tal é demonstrado na Figura 3.20., que reúne um conjunto de dados recolhidos (Blockland & Graff, 2012) de medições sonoras feitas à passagem de um ligeiro de passageiros por dois tipos de pavimento: betão liso e asfalto poroso. O nível de ruído foi recolhido a um máximo de 7,5 metros de distância da fonte. As linhas superior e inferior em cada tipo de pavimento, definem, respetivamente, a passagem mais e menos ruidosa.

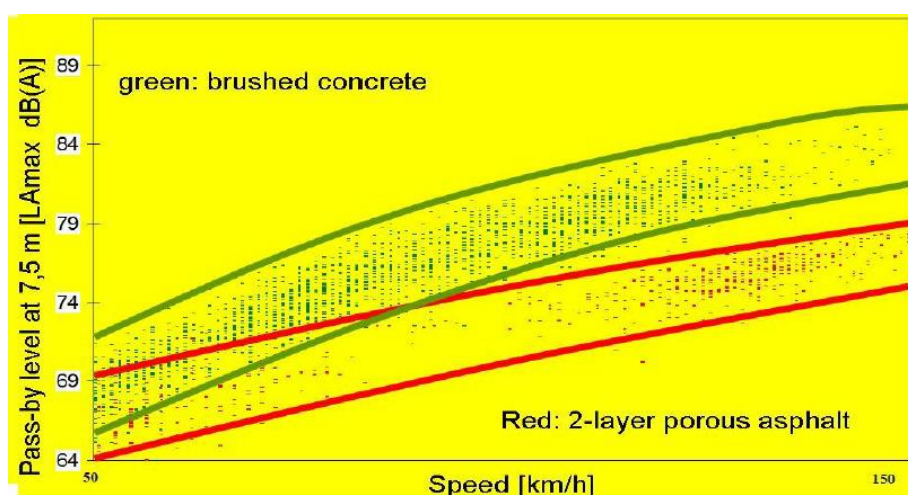


Figura 3.20. Níveis de ruído em dois tipos de pavimento: betão liso (verde) e asfalto poroso (vermelho) (Blockland & Graff, 2012)

O betão é mais ruidoso que o asfalto, sendo que na maior velocidade, o menor nível de ruído registado para o betão liso, é superior ao maior nível sonoro registado do asfalto poroso.

Fazendo uma projecção dos resultados médios em função da velocidade, para um conjunto de pavimentos, obtém-se a Figura 3.21..

Note-se que para baixas velocidades, a diferença do nível de ruído emitido entre o pavimento mais ruidoso e mais silencioso é de 8 dB, enquanto que para altas velocidades é de 12 dB.

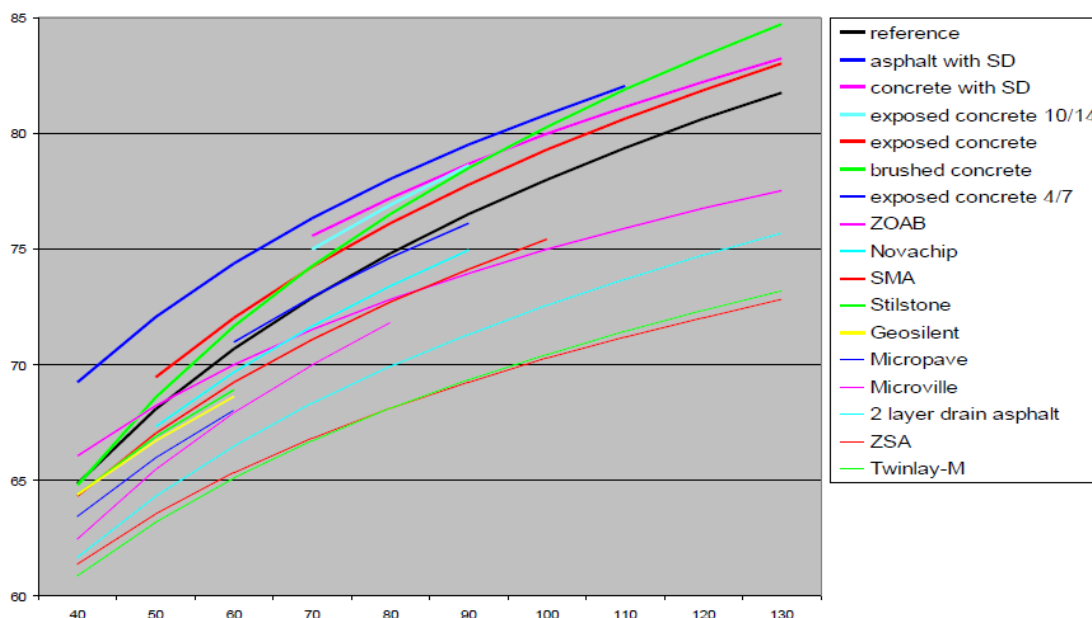


Figura 3.21. Níveis de ruído emitidos por diferentes pavimentos em função da velocidade (Blockland & Graff, 2012)

Os pavimentos mais silenciosos são o Twinlay-M e o ZSA, ambas marcas de asfaltos registadas, e o mais ruidoso é o asfalto com SD.

Os pavimentos silenciosos, geralmente têm um acabamento mais aprimorado, o que atenua o ruído do rolamento e potencia o efeito dos pneus de baixa emissão de ruído. Já as superfícies porosas com boa absorção acústica, demonstram bom desempenho na atenuação do ruído do rolamento e da propulsão do veículo, para uma larga gama de velocidades.

As primeiras experiências com pavimentos silenciosos revelaram poucas vantagens na sua utilização. As suas qualidades acústicas notáveis perdiam-se, face ao rápido desgaste, sendo então necessária a substituição da sua superfície.

É demonstrado pela Figura 3.22., que a degradação (ao longo dos anos) de estradas com baixa emissão acústica comparada com as condições de referência de uma superfície nova (betão asfáltico denso), leva a uma redução das suas propriedades acústicas, acabando por perdê-las totalmente no final do seu período de vida. Nessa altura, existe então, uma necessidade de renovação do pavimento silencioso, recuperando então as propriedades acústicas.

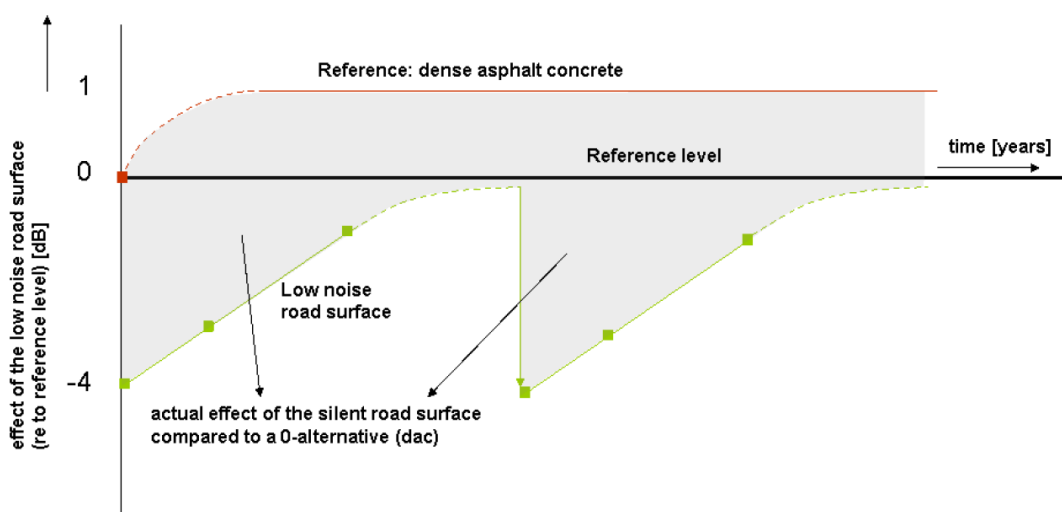


Figura 3.22. Redução de ruído introduzido por uma superfície de baixa emissão acústica ao longo do seu ciclo de vida, tendo como referência uma superfície de betão asfáltico denso.

Redução média de ruído: 2,9 dB. (Blockland & Graff, 2012)

A durabilidade, segurança e custo dos pavimentos de baixa emissão acústica são as principais preocupações na aplicação deste tipo de pavimento. O seu custo é ligeiramente mais alto do que o betão asfáltico denso e muito mais baixo do que superfícies betonadas. Porém, a longo prazo pode-se tornar dispendioso, devido à necessidade de substituição da camada superficial.

Os desenvolvimentos nesta matéria são feitos essencialmente a nível nacional, muito devido às diferentes condições de tráfego de cada país (ou zona da Europa) e porque os procedimentos da elaboração de projeto de estradas, apenas estão regulamentados à escala nacional. De qualquer forma, existe uma preocupação em evoluir tanto a nível de durabilidade da superfície (caraterísticas mecânicas) como de performance acústica.

O tratamento do pavimento é, sem dúvida, uma forma de atenuar os níveis de ruído. Porém, é também possível introduzir sistemas no pavimento, que combinados com as caraterísticas do pavimento produzem melhorias na emissão sonora.

Exemplo destes sistemas, são os ressoadores enterrados. Um ressoador consiste numa configuração composta por uma caixa oca, com um pescoço semelhante ao de uma garrafa. A frequência de ressonância pode ser ajustada e depende da área da secção transversal, comprimento do pescoço e do volume da caixa (Figura 3.23.).

Colocando ressoadores acústicos num pavimento de asfalto poroso (HOSANNA partners, 2013), duas melhorias podem ser registadas: atenuam a propagação sonora através do pavimento e reduzem a amplificação sonora associada ao efeito de Horn (ver subcapítulo 3.3.1.).

O coeficiente de absorção acústica medido perpendicularmente a um pavimento com duas camadas iguais de 7 centímetros, de asfalto poroso, atinge um máximo nos 600 Hz e nos 1800 Hz. Este pode ser melhorado se se introduzir ressoadores ajustados para uma frequência de 1 kHz, melhorando a atenuação de ruído em 3 dB(A).



Figura 3.23. Ressoador coberto de asfalto poroso (esquerda) e colocação de ressoadores para a melhoria de um pavimento asfáltico poroso (direita) (HOSANNA partners, 2013)

Medições feitas 3 anos depois da introdução de ressoadores numa autoestrada, indicaram uma melhoria da redução sonora (para as condições iniciais sem ressoadores) em 3-4 dB(A) para ligeiros de passageiros e 2 dB(A) para pesados, com um recetor a 1,2 metros de altura e a 7,5

metros de distância. Esta experiência permitiu concluir que o sistema não perdeu as suas capacidades de mitigação de ruído passados 3 anos da sua introdução.

A eficácia deste tipo de solução depende diretamente da frequência para a qual está ajustada e das frequências experimentadas pelo sistema ressoadores acústicos + pavimento.

Na Figura 3.24. é ilustrada a eficácia da solução para diferentes frequências. Estes foram registos feitos por um recetor a 1,2 metros de altura e 7,5 metros de distância de um pavimento de asfalto poroso onde circulavam veículos ligeiros a uma velocidade média de 100 km/h.

A introdução de ressoadores acústicos melhorou a atenuação de ruído em 3 dB(A).

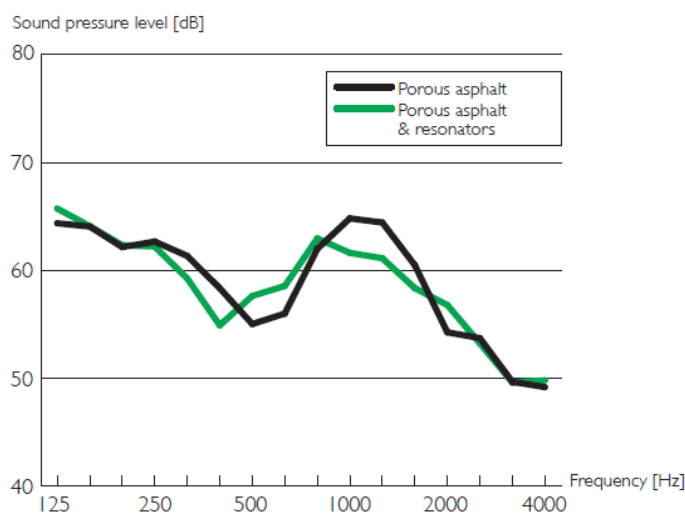


Figura 3.24. Nível de pressão sonora com e sem ressoadores, em função da frequência (HOSANNA partners, 2013)

3.4 Tratamento do solo envolvente às vias

Se é essencial o conhecimento técnico do tipo pavimento rodoviário, das suas texturas e das camadas necessárias ao seu correto funcionamento, por forma a diminuir a possibilidade de criar ruído excessivo aquando da sua utilização, também é importante saber que é possível obter resultados acusticamente satisfatórios para os recetores se se apostar no tratamento do solo adjacente às vias de circulação.

Tratamentos como a criação de rugosidade artificial, usando pequenos blocos duros ou criando sulcos ou fendas, introdução de faixas macias ou mudança do tipo de solo e/ou a sua cobertura (por exemplo, vegetação com propriedades acusticamente favoráveis), têm como

objetivo explorar a capacidade que o solo tem de refletir ondas sonoras destrutivas (que diminuem a amplitude da onda sonora) ou construtivas (aumentam a amplitude da onda sonora).

3.4.1 Matrizes de elementos rugosos em solos duros

A introdução de pequenos objetos sobre uma superfície acusticamente rígida, introduz um efeito de irregularidade, alterando a reflexão das ondas sonoras, reduzindo assim as frequências para as quais acontecem fenómenos de interferência destrutiva.

A eficácia de uma matriz destes elementos rugosos, depende da sua altura média, o seu espaçamento, secção transversal, largura total da matriz e se a disposição dos elementos é uniforme ou aleatória.

A distribuição aleatória traz mais benefícios do que uma distribuição uniforme. Apesar da conceção de uma distribuição uniforme ser mais simples e de representar benefícios no que toca a aspetos estéticos, o efeito acrescentado à interferência destrutiva nas ondas sonoras, apenas se faz sentir para certas gamas de frequência. Pelo contrário, as distribuições aleatórias cobrem uma grande gama de frequências, tornando-se mais vantajosas para aplicações de atenuação do ruído de tráfego.

Se as condições meteorológicas forem favoráveis e o comprimento da rede de blocos for suficiente, a atenuação de ruído introduzida pela rede, para um dado recetor, localizado a mais de 50 metros da via, é muito pequena. Por exemplo, nestas condições, a diferença do nível de ruído entre um recetor localizado a 50 metros de distância da via e outro a 250 metros, é de apenas 1 dB(A).

Se a circulação de veículos pesados for superior à de veículos ligeiros, a eficácia deste tipo de solução é posta em causa devido às baixas frequências produzidas pelo motor deste tipo de veículo.

Na Figura 3.25. são ilustrados dois tipos de configuração. Apesar da configuração em rede quadrada ter metade da altura da configuração em filas, a redução sonora introduzida é semelhante.



Figura 3.25. Dois tipos de distribuição, ambas com 1440 tijolos: à esquerda 9 filas feitas com tijolos empilhados, à direita rede quadrada de tijolos (HOSANNA partners, 2013)

Uma vantagem da solução em rede é que a sua eficácia acústica, não depende tanto do ângulo azimutal obtido a partir da reta fonte-recetor, como a da solução em filas paralelas.

Para efeitos de comparação foram (HOSANNA partners, 2013) recolhidos níveis de pressão sonora a uma altura de 1,5 metros e a 50 metros de uma estrada urbana de duas vias (5% de pesados e 95% de ligeiros, a viajarem a uma velocidade média de 50 km/h), em 3 condições diferentes (Figura 3.26.): sem tratamento acústico (preto), 16 paredes paralelas com espessura de 0,05 metros e 0,3 metros de altura espaçadas de 0,2 metros que no seu conjunto formavam um elemento com 3,05 metros de largura (verde) e, por fim, uma rede quadrada com uma largura de 1,53 metros e 0,3 metros de altura (cinza).

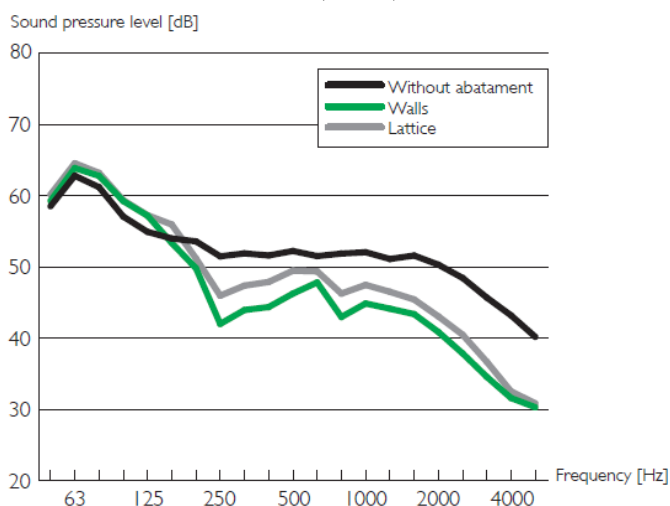


Figura 3.26. Redução de ruído introduzido pela criação de irregularidades no solo: solução parede (verde) solução rede (cinza) (HOSANNA partners, 2013)

As duas soluções estão distanciadas de 2,5 metros da via de tráfego mais perto e o recetor está localizado na linha que divide as paredes a meio.

É previsto que a redução sonora introduzida pela parede seja de 7 dB(A) e pela solução em rede seja de 6 dB(A).

Testaram-se (HOSANNA partners, 2013) soluções com diferentes configurações para concluir o efeito que teria a variação de características na redução sonora.

Uma solução de 26 paredes paralelas, cuja secção transversal era um triângulo equilátero, com 0,247 metros de altura, formando um conjunto com largura de 15 metros, foi posicionada a 1 metro da via mais exterior de uma autoestrada (15% de pesados e 85% de ligeiros, a viajar a uma média de 70km/h) com 4 vias de trânsito. Os recetores a 1,5 metros e a 4 metros de altura, ambos a 40 metros da via, registaram reduções sonoras de 8,5 dB(A) e 3 dB(A).

Apesar da secção transversal ter um efeito na redução sonora, a melhoria relativamente a uma secção retangular com 0,3 metros de altura, e para esta autoestrada, é de apenas 1 dB.

Se por outro lado, se utilizar aglomerados de paredes de diferentes tamanhos, em vez de paredes idênticas espaçadas igualmente, obtém-se uma redução sonora maior. Porém, esta solução ocupa uma área superior.

Para um recetor a 50 metros de distância e 1,5 metros de altura, um aglomerado de paredes com alturas variáveis, 16 metros de largura e em arranjo fractal, posicionado ao lado de uma rua urbana (5% de pesados e 95% de ligeiros, velocidade média de 50 km/h), comparado com uma solução de solo rijo, acrescenta uma redução sonora de 11 dB(A). Mais 2,5 dB(A) do que um conjunto de paredes com 16 metros de largura, igualmente espaçadas e com altura igual.

A introdução deste tipo de sistema que provoca irregularidades no solo, pode também ser utilizado em bermas inclinadas, melhorando a redução sonora introduzida por este tipo de elemento.

Se se introduzir no topo de uma berma trapezoidal, sulcos (0,2 metros de profundidade, 1,25 centímetros de largura e espaçados da sua linha média 2,5 centímetros) igualmente espaçados, prevê-se que seja introduzida uma redução sonora de 7 dB(A). Se ambos os lados da via, tiverem bermas deste tipo, a redução sonora será de 10 dB(A).

Pode-se ainda conjugar o sistema de parede paralela ou o sistema em rede com amontoados de cascalho, solo ou areia, nos intervalos, acrescentando assim eficácia no que toca à atenuação de ruído.

Os sistemas suprarreferidos podem também ser aplicados à mitigação de ruído ferroviário.

Por exemplo, um sistema de 16 paredes paralelas, num total de 3,05 metros de largura, situado a 1 metro de distância da berma da linha de um comboio, é capaz de reduzir o ruído em 6 dB(A), num recetor situado a 50 metros da linha e a 1,5 metros de altura. Se se optar por dois aglomerados de quatro paredes acusticamente duras e macias, a atenuação será de 6-7 dB(A) e 7-8 dB(A), respetivamente.



Figura 3.27. Ilustração de uma solução de paredes paralelas baixas na mitigação de ruído ferroviário (HOSANNA partners, 2013)

3.4.2 Cascalho

É estimado que uma faixa ou múltiplas faixas de cascalho, alternadas com faixas de igual dimensão de um pavimento duro, atenuem entre 3 a 9 dB(A) o nível de ruído registado por um recetor a 1,5 metros de altura e a 50 metros de distância de uma estrada urbana. Reduções de ruído semelhantes, entre 2 a 6 dB(A), podem ser registadas se se substituir 50% do solo duro junto a uma linha férrea, por cascalho.

Apesar de ser esteticamente mais apelativo dispor várias faixas de cascalho, em vez de apenas uma com a mesma largura, isso não traz qualquer tipo de melhoria na mitigação de ruído. Uma faixa com mais de 25 metros de largura, não é melhor do que ter uma faixa de 25 metros, e o número de faixas deste tipo de soluções também não parece influenciar a atenuação acústica.

Também uma solução de solo macio pode ser combinada com faixas de pavimento duro, sendo assim possível a colocação de ciclovias ou caminhos pedestres, acrescentando funcionalidade a estes sistemas (Figura 3.28.). Esta opção, tem, porém, de se fazer acompanhar por uma faixa de maior largura, por forma a obter reduções sonoras aceitáveis e equivalentes àquelas que se teriam se apenas existisse uma grande faixa de solo macio.

Se por outro lado, o cascalho formar padrões, como por exemplo padrões axadrezados, isso diminui a dependência que a redução de ruído tem do ângulo azimutal, podendo-se obter algumas melhorias acústicas.



Figura 3.28. Exemplo de aplicação de solo macio conjugado com faixas de circulação, acrescentando funcionalidade ao sistema (HOSANNA partners, 2013)

3.4.3 Coberturas macias

A substituição de pavimentos duros (por exemplo, asfalto) por coberturas macias (por exemplo, relvados), entre a fonte e o recetor, pode reduzir substancialmente os níveis de ruído.

A introdução de 45 metros de largura de qualquer tipo de cobertura macia, colocada a 5 metros de uma estrada, reduz entre 5 a 9 dB(A) de ruído, para um recetor a 50 metros da fonte e a uma altura de 1,5 metros. Nas mesmas condições, mas para uma linha ferroviária, são registados níveis de atenuação de 3-5 dB(A).

O tipo de cobertura é muito importante para se obterem resultados satisfatórios. Se se usar relva como cobertura, a permeabilidade ao ar do solo é um parâmetro muito importante. Para solos porosos é esperada uma maior atenuação se o solo for muito permeável.

Um solo que é muito compactado tende a apresentar uma menor permeabilidade ao ar e assim, atenuar menos o ruído. Assim, uma cobertura relvada é menos eficaz que um prado, cuja vegetação é mais solta (Figura 3.29.).

O gráfico representado na Figura 3.29. é referente a 3 tipos de soluções posicionadas entre um recetor a 1,5 metros de altura e a 50 metros de uma estrada (5% de pesados, 95% ligeiros, velocidade média de 50 km/h). A atenuação prevista para o relvado compacto é de 5 dB(A) e para o prado é de 8 dB(A).

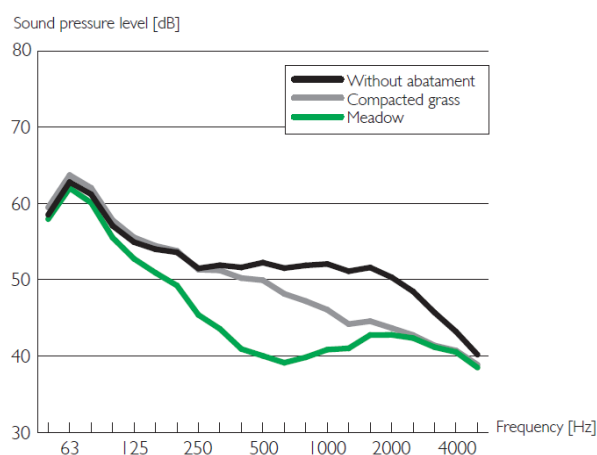


Figura 3.29. Níveis de pressão sonora em 3 soluções: Sem medida de mitigação (preto), relvado compacto (cinza) e prado (verde) (HOSANNA partners, 2013)

3.4.4 Campos agrícolas

Campos de trigo ou de milho, por exemplo, podem contribuir para a atenuação de ruído junto a vias de comunicação. Estas zonas de cultivo, são comumente caracterizadas pela área de folha por unidade de volume e pelo tamanho médio da folha.

O milho, por exemplo, tem uma folha maior do que a do trigo. Porém, no que toca à área de folha por unidade de volume, é menor do que a do trigo.

A eficácia do sistema depende da combinação da planta com o solo. Por exemplo, um sistema de um solo muito permeável e denso, e uma planta com folha de grandes dimensões, atenua o ruído proveniente de uma estrada em 9-13 dB(A), dos quais 1-5 dB(A) são devido ao efeito da planta, num recetor a 50 metros de distância da via e 1,5 metros de altura. Para um recetor a 5,5 metros de altura a atenuação total é de 2,5-7 dB(A), dos quais 0,3-4,5 dB(A) são devidos ao campo agrícola.

3.5 Tratamento de fachadas e telhados

A vegetação pode ajudar a reduzir os níveis de ruído em ruas delimitadas por edifícios altos (canions urbanos), pátios ou em praças, locais onde as fachadas dos edifícios promovem um aumento do nível sonoro.

O efeito benéfico da vegetação está relacionado com a sua capacidade de absorção (das folhas e ramos), difusão sonora (ocorre quando uma onda sonora embate na vegetação e é refletida de volta) e transmissão sonora (ocorre quando uma onda sonora passa através da vegetação).

De seguida são apresentadas soluções ecológicas que ajudam na atenuação do ruído urbano.

3.5.1 Fachadas verdes

Em zonas urbanas onde ocorrem múltiplas reflexões sonoras (HOSANNA partners, 2013), devido à quantidade de superfícies rígidas existentes, a presença de vegetação, ajuda a aumentar o efeito de difusão da onda sonora, diminuindo a sua intensidade a cada reflexão, e absorvendo parte dela.

Em canions urbanos (HOSANNA partners, 2013) a vegetação pode ser colocada diretamente nas fachadas dos edifícios (Figura 3.30.). O sistema consiste numa estrutura de suporte que alberga geotêxtis ou vasos, que são preenchidos com plantas e solo.



Figura 3.30. Exemplo do tratamento das fachadas de um canion urbano (HOSANNA partners, 2013)

A eficácia desta solução prende-se com fatores como a largura do canion, o tipo de vegetação, posicionamento do substrato e posicionamento do recetor. A eficácia da solução aumenta para um canion mais estreito e para uma maior distância fonte-recetor.

Para uma rua (HOSANNA partners, 2013) com fachadas de 19 metros de altura de cada lado, foi calculado a atenuação sonora para duas situações: uma sem tratamento acústico, e portanto, fachadas com baixo nível de absorção e outra com tratamento acústico, que consistia numa estrutura de suporte, solo e vegetação. Para um recetor entre 1,5 metros a 4 metros de altura é estimada uma melhoria de 2-3 dB(A) se de uma fachada verde se tratar. Se apenas a metade superior da fachada estiver coberta com esta solução é registada uma redução de ruído

de apenas 1 dB(A). Se por outro lado, for a metade inferior a estar tratada, a redução será de 2 dB(A). A eficácia desta solução pode ainda ser melhorada se se posicionar uma barreira vegetal baixa entre as vias de tráfego, obtendo uns adicionais 2 dB(A).

Também em praças se pode aplicar sistemas vegetativos fixos em fachadas (Figura 3.31.). Para uma praça (HOSANNA partners, 2013) com um lado paralelo a uma estrada, foi aplicado um sistema vegetativo que cobria as fachadas de toda a praça e da rua adjacente. Para um recetor a 1,5 metros de altura é registada, em média, uma redução sonora de 3 dB(A). Se a vegetação estiver aplicada apenas nas partes superiores, é registado 1 dB(A) de atenuação, se estiver nas partes inferiores, este valor é de 2 dB(A). A eficácia pode ser melhorada em 4 dB(A) se for colocado entre a praça e a rua, uma barreira vegetal com 1 metro de altura.



Figura 3.31. Exemplo do tratamento com fachadas verdes numa praça (HOSANNA partners, 2013)

Uma zona calma junto às habitações, como um pátio, pode reduzir os níveis sonoros e assim reduzir o risco de aparecimento de problemas como a irritação devido ao ruído ou distúrbios de sono. Os pátios podem-se situar estrategicamente junto à fachada mais exposta ao ruído e assim ajudar a reduzir a exposição.

O coeficiente de absorção sonora da fachada que rodeia o pátio determina o nível sonoro experimentado nos pátios. Por isso, esta fachada pode integrar um sistema vegetativo de forma a aumentar a eficácia da atenuação do ruído proveniente de fontes exteriores ao pátio.

O efeito das fachadas verdes é melhor para altas frequências e para recetores a baixa altura.

3.5.2 Telhados verdes

Os sistemas vegetativos posicionados nos telhados podem (HOSANNA partners, 2013) promover a absorção sonora das ondas que viajam da rua para pátios entre edifícios.

A eficácia da absorção depende da forma do telhado. Na ausência de vegetação, é esperado que, para um volume de construção igual, os telhados planos produzam melhores resultados que os inclinados.

Porém, para uma solução vegetativa com 10 centímetros de substrato, colocada num telhado que rodeia um pátio, é registada uma redução sonora de 2 dB(A) para um telhado plano e 8 dB(A) para um telhado inclinado.

A fim de comparar a eficácia de duas situações num telhado inclinado, uma sem tratamento e outra com tratamento vegetativo, face ao ruído proveniente de uma estrada urbana (5% de pesados, 95% de ligeiros e velocidade média de 50 km/h), ilustra-se de seguida (Figura 3.32.) os níveis sonoros para um recetor posicionado num pátio rodeado pelas duas soluções.

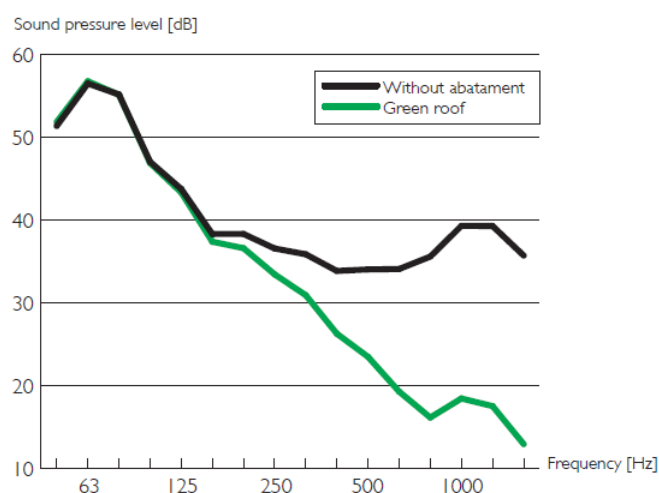


Figura 3.32. Nível de pressão sonora num telhado com e sem tratamento vegetativo (HOSANNA partners, 2013)

É então registada uma diferença de 8 dB(A) de atenuação de ruído entre a solução sem tratamento e a solução com tratamento, para um recetor posicionado num pátio, cuja separação entre si e uma estrada de duas faixas é um edifício.

Pode ainda recorrer-se a uma variante deste tipo de solução (Figura 3.33.) que é o tratamento das arestas dos telhados com barreiras vegetativas baixas (com altura de 0,6 metros, por exemplo). Esta solução, apesar de ser eficaz, produz uma atenuação de ruído baixa (de 1 a 3 dB(A)).



Figura 3.33. Exemplo de tratamento vegetativo das fachadas e telhados em canions urbano e pátio (HOSANNA partners, 2013)

3.6 Medidas exclusivas para ruído ferroviário

3.6.1 Design e manutenção da roda

As rodas dos veículos ferroviários ao longo do seu período de vida sofrem desgaste, o que modifica a sua geometria, e promove um aumento da geração de ruído. Rodas desgastadas e com imperfeições podem aumentar a geração de ruído de 5 a 10 dB(A). Por outro lado, rodas reperfiladas diminuem o ruído de 5 a 10 dB(A) (Hanson et al, 2006).

Também o uso de travões a disco em vez de travões de bloco de ferro fundido, podem reduzir a produção de ruído em 15 dB(A) (Carlsson, U., 2003).

Algumas alterações no design das rodas podem ajudar a diminuir a intensidade sonora do ruído proveniente do rolamento. Se se usar rodas resilientes (Figura 3.34.) pode-se obter uma redução de 3 a 6 dB(A), sendo que para o “Curve Squeal” (ver subcapítulo 2.3.2.) obtém-se uma redução de 10 a 20 dB(A). Também se pode optar por usar rodas amortecidas (Figura 3.34.), anexando peças amortecedoras nas rodas tradicionais, obtendo uma redução de 5 a 15 dB(A) em manobras em curvas apertadas, onde a vibração se faz sentir com mais intensidade (Hanson et al, 2006).



Figura 3.34. Rodas resilientes (esquerda) e rodas amortecidas (direita) (Lakušić & Ahac, 2012)

3.6.2 Sistemas para o carril

No que se refere à diminuição de ruído ao nível da linha férrea, o objetivo passa sempre por diminuir as vibrações que se propagam a esse nível utilizando sistemas que aumentam a flexibilidade dos elementos, aumentando a sua capacidade para absorver as vibrações.

Sistemas de fixação pré-esforçados (<http://www.d2sint.com>), como os da Figura 3.35., possuem na base uma mola tensionada com 80% da carga estática da passagem do veículo. A mola, aquando da passagem do veículo, descarrega completamente, não havendo lugar para a transmissão de vibrações, e podendo atenuar 20 dB de vibração (<http://www.railway-technology.com>).



Figura 3.35. Sistema de fixação pré esforçado (<http://www.pandrol.com>)

Sistemas ferroviários embutidos discretos ou contínuos consistem em isolar o carril da parte rígida da linha férrea (Figura 3.36.). Uma forma de obter isso é injetar nas laterais do carril um material elástico, diminuindo a possibilidade de o carril vibrar. Com esta técnica podem-se obter melhorias de 10 dB(A) (General for Energy and Transport of European Commission Directorate, 2001).



Figura 3.36. Instalação de material elástico (Lakušić & Ahac, 2012)

O Rail Dumper é um dispositivo que amortece as vibrações transmitidas pelo rolamento do comboio para a linha (Figura 3.37.). É colocado na lateral do perfil do carril (normalmente nos dois lados) havendo a possibilidade de ser colocado também na parte inferior.

O seu objetivo é (<http://www.wonros.com/rail-dampers>) reduzir as oscilações do carril, através das massas de aço colocadas em seu redor, que são amortecidas por uma borracha colocada entre elas e o carril.

A complexidade associada à conceção de um *Rail Dumper*, provém essencialmente do facto da borracha ser um material cuja rigidez e capacidade de amortecimento depende fortemente da carga aplicada, da frequência e da temperatura.

Estes dispositivos podem ser utilizados em qualquer tipo de trilhos, tenham eles ou não balastros, ou sejam eles ou não destinados a comboios de alta velocidade. É de resto um dispositivo que ainda está sob desenvolvimento.

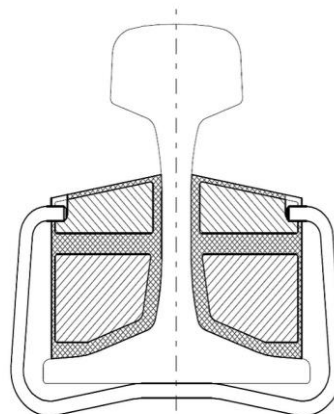


Figura 3.37. Aplicação e aspeto interno dos Rail Dumpers (<http://www.wonros.com/rail-dampers>)

3.6.3 Imperfeições e manutenção da linha

Uma grande parte do ruído no tráfego ferroviário é produzido no choque das rodas com os carris, nos tramos com descontinuidades. A manutenção periódica destas descontinuidades (cruzamentos e mudanças de trilho) e a introdução de dispositivos que reforcem as zonas de falhas, são formas de controlar o ruído produzido.

A rugosidade do próprio carril pode ser um fator importante na produção de ruído. Um estudo alemão (Carlsson, U., 2003) revelou que existe uma diferença de 15 dB(A) na produção de ruído de um carril com superfície áspera e um de superfície macia. Ao ser implementado um programa de manutenção da via consegue-se controlar a degradação da mesma e reparar zonas danificadas, garantindo uma produção de ruído mínima.

3.6.4 Introdução de elementos resilientes e elastoméricos

A colocação de material resiliente como é a borracha, abaixo da travessa de betão que suporta a linha férrea, pode diminuir as vibrações transmitidas para o solo ou para a estrutura (no caso de pontes ou túneis) (Figura 3.38.).

A introdução deste tipo de elementos pode ser efetuada em linhas férreas com ou sem balastros, sendo que a presença de balastros constitui uma vantagem no que toca a absorção de vibração.

Um estudo feito pelo Departamento dos Transportes, na Faculdade de Engenharia Civil de Zagreb (Lakušić & Ahac, 2012), revelou que o uso de uma manta de borracha debaixo da travessa de betão pode reduzir as vibrações em 16 dB(A).

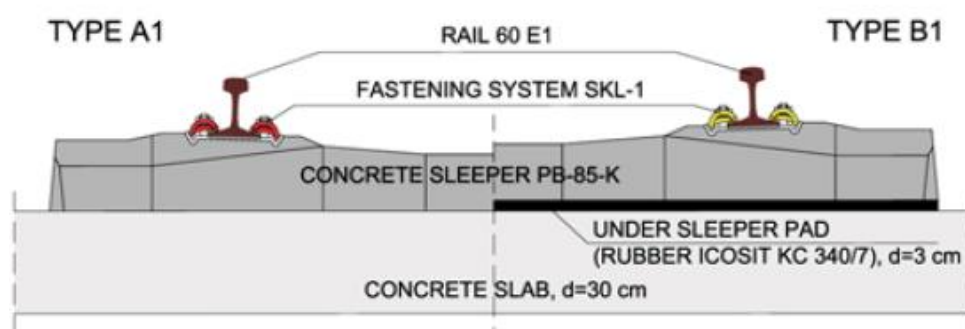


Figura 3.38. Introdução de uma manta elástica de borracha (Lakušić & Ahac, 2012)

A colocação de um material elastomérico debaixo de uma placa de betão que suporta a linha ferroviária ajuda a reduzir as vibrações que se transmitem para uma estrutura subjacente.

Este foi o caso de uma passagem pedestre inferior situada, na rua Horvacanska, Zagreb. A manta de material elastomérico foi colocado entre a placa de betão da linha e laje de betão da passagem (Figura 3.39.).



Figura 3.39. Rua Horvacanska, Zagreb (Lakušić & Ahac, 2012)

3.6.5 Barreiras e trincheiras

As barreiras acústicas são os sistemas mais eficazes de mitigação do ruído aéreo que chega ao recetor. Nesta dissertação foram apresentadas anteriormente algumas barreiras ecológicas e sustentáveis que podem ser aplicadas neste tipo de meio de transporte. A sua eficácia depende essencialmente da sua extensão, altura, do material utilizado e da distância ao recetor.

Com o uso de trincheiras (Figura 3.40.), pode-se controlar as vibrações que se propagam no solo. A eficácia deste tipo de sistema depende da profundidade da trincheira e da rigidez do material de enchimento.

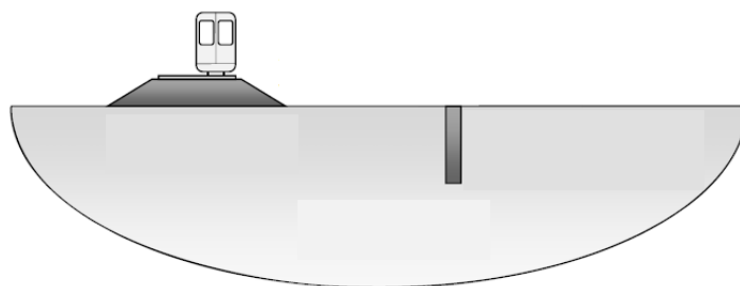


Figura 3.40. Colocação de uma trincheira aberta ou cheia de material, junto a uma linha férrea (Costa, 2015)

No caso de zonas urbanas onde o uso de trincheiras for impossível, pode-se usar, em alternativa, barreiras subterradas, que se implementam perto da linha férrea. A atenuação das

vibrações é conseguida com uma composição de solo modificado, por exemplo, uma mistura do solo existente com cal viva. A sua profundidade depende da frequência de vibração que se pretende reduzir.

3.7 Tratamento na fonte

3.7.1 Pneus

Existem 3 categorias de pneus: C1, C2 e C3. A categoria C1, associada a veículos ligeiros, está separada em subcategorias (A, B, C, D e E) divididas por larguras nominais da secção que podem ter algumas variantes como por exemplo o “pneu reforçado”, que se distingue do pneu normalizado pela sua maior capacidade de carga ou “pneu de neve”, especialmente concebido para um melhor desempenho na neve. As categorias C2 e C3, associadas a veículos pesados, dividem-se entre os normalizados e os de “tração”.

O pneu é sujeito a diversos ensaios: mecânicos, de estabilidade, etc. Se no final dos testes o pneu preencher vários requisitos de diferentes classes, pode ser classificado em mais de uma classe.

Segundo o regulamento aplicado aos novos pneus, EC/661/2009, os valores limites de ruído produzido pela classe C1 são de 70 a 74 dB(A), já para a classe C2 estão entre 72 e 73 dB(A) e para a C3 estão entre 73 e 75 dB(A).

Este regulamento aplica-se a pneus novos, sendo que os pneus recauchutados, não têm de cumprir nenhum valor limite. Os pneus recauchutados representam parte do número de pneus C1, principalmente os pneus de inverno, e metade do total de pneus C2 e C3, em circulação. Isto quer dizer que metade dos pneus usados em veículos pesados não estão sujeitos a limites de ruído emitido.

Uma revisão dos níveis de ruído permitidos para a frota de pneus de categoria C1 é ilustrado na figura abaixo, inserida no relatório “Measures on road traffic noise in the EU” (Blockland & Graff, 2012).

Em 2001 (Figura 3.41.), 99% dos pneus testados estavam dentro do valor limite de emissão sonora (corrent limit) estabelecido pela diretiva europeia. No final de 2012, este valor limite baixou entre 4 a 5 dB(A), inviabilizando 60% da utilização dos pneus existentes em 2001, que terão de ser sujeitos a melhorias.

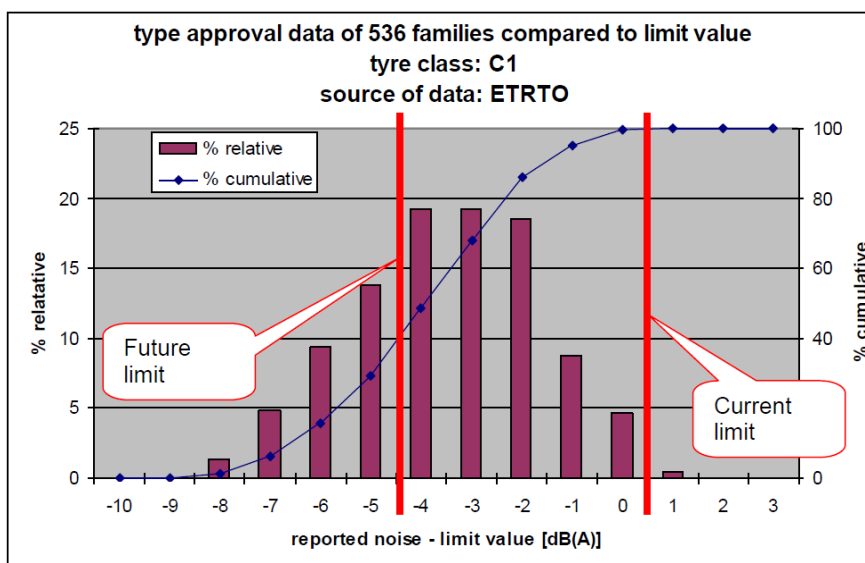


Figura 3.41. Distribuição estatística dos pneus aprovados para circulação em 2001, comparando com os limites estabelecidos em EC2001/43 e EC661/2009 (Blockland & Graff, 2012)

É então imperativo, melhorar as características acústicas do pneu. Nos últimos anos na Europa, tem-se feito progressos tanto no meio de fabrico como junto do consumidor final.

A sensibilização para a escolha de pneus com melhores características é reforçada em 2012, pela Comunidade Europeia, pela imposição de um rótulo que deve indicar a segurança, sustentabilidade e nível de ruído produzido pelo pneu (Figura 3.42.).

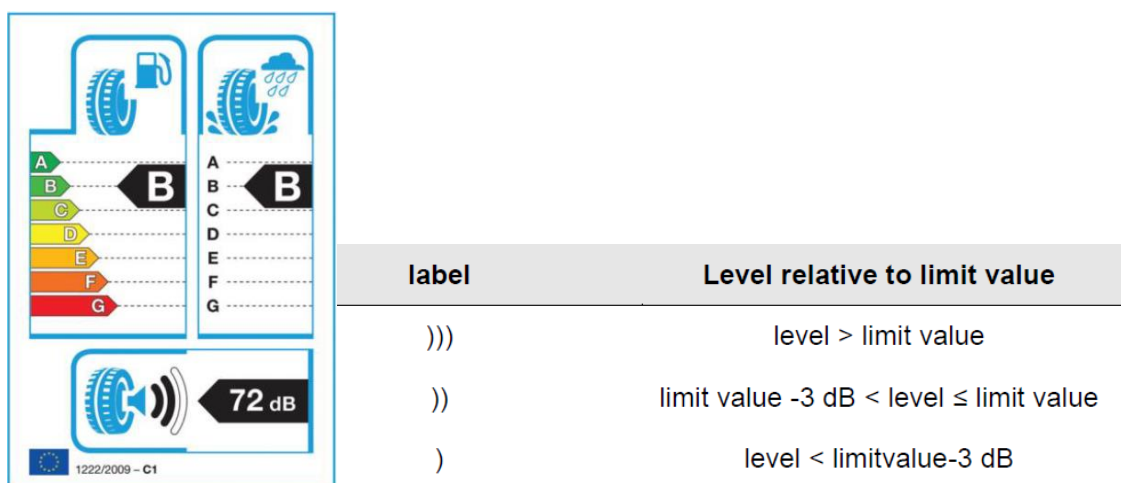


Figura 3.42. Exemplo de um rótulo, que classifica a resistência de rolamento, a resistência à hidroplanagem e o nível sonoro emitido pelo pneu e a respetiva simbologia (tabela ao lado) (Blockland & Graff, 2012)

A escolha do consumidor é então baseada num rótulo normalizado para todos os pneus e para os quais são feitos testes de aderência, de resistência e de captação do nível sonoro emitido pela passagem do pneu por pavimentos normalizados (ISO10844:1994).

3.7.2 Veículos elétricos e híbridos

A utilização significativa deste tipo de veículos pode introduzir, nas cidades, uma melhoria na qualidade do ar e na qualidade sonora.

Diversos autores (Compett, 2013) efetuaram ensaios experimentais para avaliar a partir de que velocidades estes veículos podem gerar menos ruído relativamente a um veículo a combustão interna, tendo verificado que, para o caso dos ligeiros de passageiros esta redução sonora ocorre para circulações abaixo dos 50 km/h.

A Figura 3.43., apresenta o resultado de um estudo efetuado por Joël Lelong and Roger Michelet, 2001, onde se compara o ruído gerado por um veículo a combustão interna conduzido a diferentes velocidades e em diferentes mudanças com um híbrido e um elétrico, onde é possível verificar o ganho mencionado.

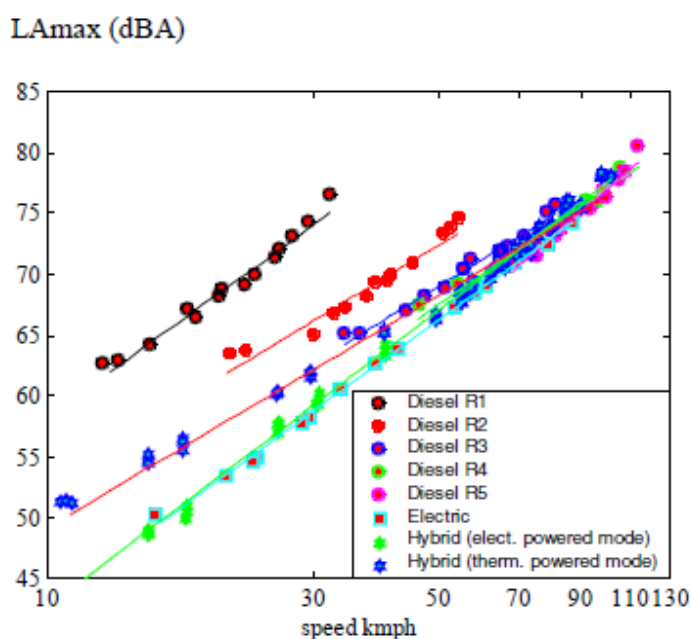


Figura 3.43. Nível sonoro máximo gerado por diferentes veículos (Joël Lelong and Roger Michelet, 2001)

Comprovou-se ainda que as reduções sonoras máximas podem se situar entre 7 e 15 dB dependendo do tipo de veículo. Esta diferença deve-se ao motor, que, como foi já referido anteriormente, é o principal promotor de ruído em baixas velocidades, para o caso dos

veículos a combustão interna. Para grandes velocidades o nível de ruído, provém maioritariamente do rolamento, pelo que a esse nível, o veículo elétrico ou híbrido é equivalente a um veículo de combustão interna. A introdução destes veículos revela-se assim vantajosa em zonas onde se promove a circulação a baixa velocidade (inferiores a 50 km/h).

Para entender as melhorias que a adoção deste tipo de veículos poderia ter para a população, expõe-se dois elementos. Um (Figura 3.44.) é proveniente de um estudo Holandês (Verheijen e Jabben, 2010) e simula o efeito que teria a total substituição de veículos de combustão interna (ICE) por veículos elétricos (EVs), nos níveis de poluição sonora da cidade, apresentando assim a redução sonora que se sentiria em várias zonas da cidade. Nesta simulação, 90% dos veículos de mercadorias e 80% dos veículos pesados, são EVs.

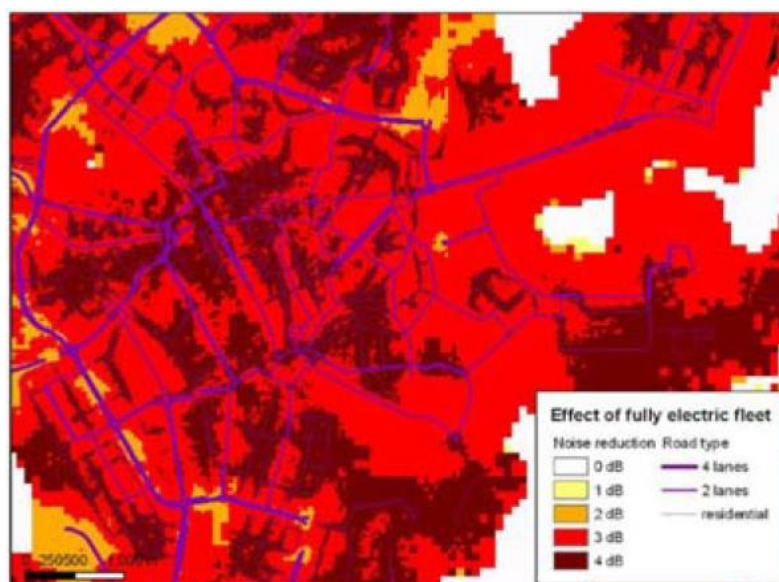


Figura 3.44. Redução sonora que se faria sentir se na cidade de Utrecht, Holanda, se substituísse parte da frota de ICEs por veículos elétricos (Verheijen e Jabben, 2010)

A Figura 3.45. é extraída de um relatório de projeto (Compett, 2013) e mostra os níveis sonoros em Park Avenue, em Nova York, se a totalidade dos veículos ligeiros de passageiros fosse substituída por veículos elétricos e as restantes tipologias de veículos fossem a combustão interna.

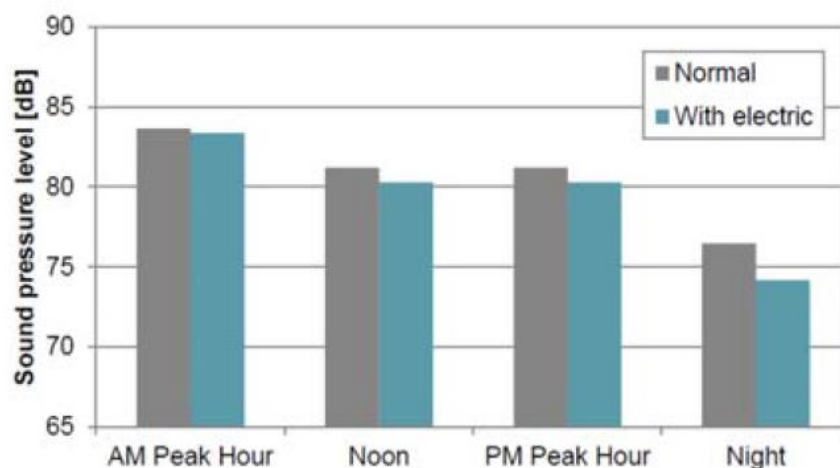


Figura 3.45. Melhorias do nível sonoro, projetadas para Park Avenue, na cidade de Nova York (Compett, 2013)

Como se pode constatar, os ganhos só serão significativos se a quase totalidade dos veículos for substituída por veículos elétricos ou híbridos, caso contrário o ruído que prevalece é o gerado pelos ICEs.

Se por um lado estes veículos são apontados como promotores de uma redução do ruído em meio urbano, uma das maiores desvantagens é o perigo de acidentes com peões e ciclistas devido à baixa intensidade de ruído que produzem para baixas velocidades.

Para colmatar este perigo, tem sido recomendado a introdução de sons de alerta, para avisar os peões da sua aproximação, pelo que a sua eficácia em termos de redução de ruído poderá diminuir. O eVader é um sistema com câmara e software de reconhecimento, do peão e do ciclista, que utiliza seis altifalantes para a alertar a sua aproximação. O som emitido é 5 dB mais baixo que o emitido pelos ICE.

Desde 2010 que as vendas de veículos elétricos têm vindo a crescer. A Electric Vehicle Initiative demonstra, através do gráfico (Figura 3.46.), que as vendas de veículos elétricos ao longo dos anos têm vindo a subir, seguindo uma tendência oposta aos veículos híbridos.

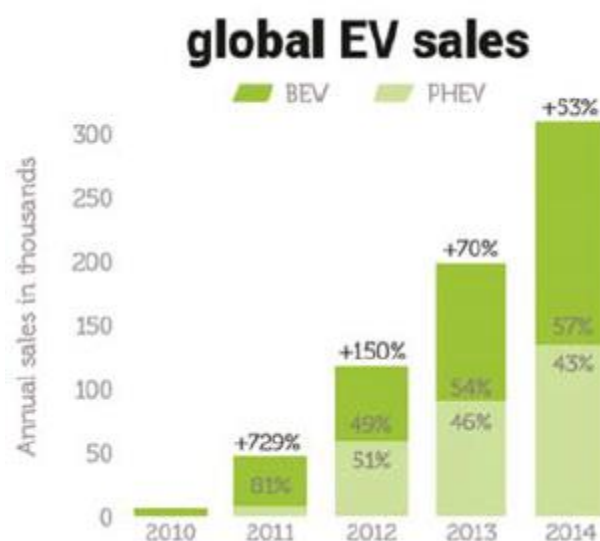


Figura 3.46. Vendas globais anuais de veículos elétricos (BEV) e híbridos (PHEV) (Electric Vehicle Initiative)

A este dado juntam-se dados recolhidos desde 2011 que evidenciam uma diminuição anual do custo da bateria e um aumento do poder de armazenamento, bem como um aumento do número de postos de carga.

Em Portugal são também registados incentivos estatuais para donos de carros elétricos: 4500,00€ no abate de veículos a combustão interna com mais de 10 anos e compra de um veículo elétrico (2015, Reforma de fiscalidade verde) e isenção de imposto único de circulação (Associação Portuguesa do Veículo Elétrico, 2010).

Através da utilização deste tipo de veículos, pode-se reduzir consideravelmente os níveis de ruído nas cidades, nomeadamente em zonas mais sensíveis, como zonas residenciais, ou com infraestruturas de saúde ou parques verdes. É então importante que se pense na possibilidade de haver uma substituição em massa de veículos de combustão interna ou, no curto prazo, implementar medidas de circulação em zonas sensíveis, que restrinjam o acesso a este tipo de veículo.

Exemplo deste tipo de medidas é o tratamento de zonas silenciosas (Q zones) (Figura 3.47.), utilizadas para proteger acusticamente determinados locais, conforme apresentado no projeto City Hush (<http://www.cityhush.eu/>). O City Hush, cofundado pela Comissão Europeia, foi um projeto que decorreu entre 2010 e 2012, que seguindo a diretiva EC 2002/49 (ver 2.5.1.), pretende fornecer orientações na realização e implementação de planos de ação relativos ao ruído nas cidades.

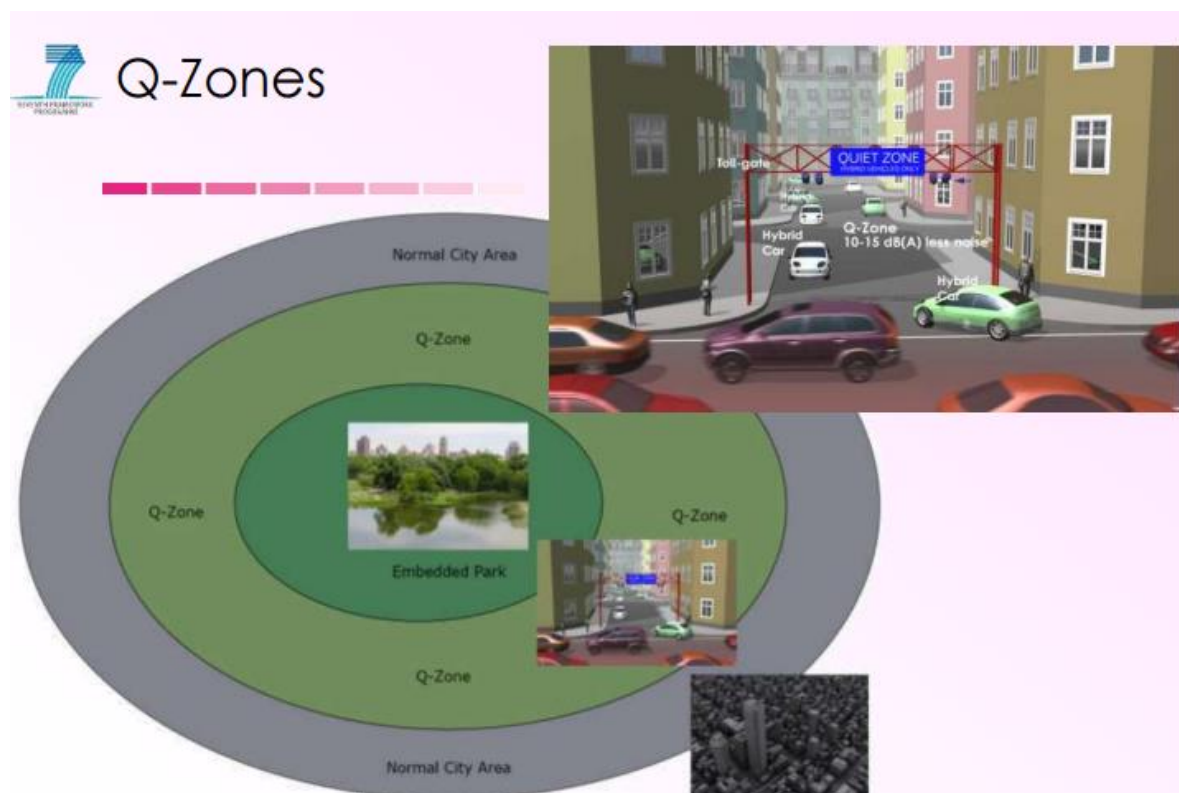


Figura 3.47. Identificação de Q-Zones que circundam o parque central da cidade (City Hush Project, 2010)

4 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

4.1 Considerações finais

No decorrer desta dissertação procurou-se mostrar que o ruído, especialmente nas cidades, onde se faz sentir mais frequentemente, é um problema para a qualidade de vida e saúde dos cidadãos que nela habitam.

Apesar dos esforços de entidade internacionais para reduzir os seus impactos, a adoção de uma visão sustentável, tem de ser feita por diversos agentes, nomeadamente entidades reguladoras nacionais, que promovam diretrizes e medidas que sejam implementadas quer pelos órgãos locais, comunidade científica, fabricantes, mas também pelos consumidores.

A END foi um grande passo nesse sentido, demonstrando que as questões ambientais, são preocupações do Parlamento Europeu e do Conselho da União Europeia.

Apesar do incentivo legislativo, muitos países continuam a não recolher dados suficientes, dificultando assim uma projeção real do número de pessoas afetadas com o ruído na Europa.

Com o avançar da tecnologia e da investigação, hoje em dia, é possível aplicar soluções que reduzam o impacto do ruído, que apesar da sua eficácia indiscutível, são muitas vezes dispendiosas.

O bom planeamento urbano é extremamente importante e acaba por ser uma forma barata de reduzir a exposição do ruído por parte de cidadãos.

Em Portugal, é incumbência das câmaras municipais a implementação dos planos de ação no sentido de garantir os níveis de ruído regulamentares, pelo que é fundamental que os técnicos estejam conscientes da importância deste instrumento na garantia da qualidade sonora das cidades.

A colocação de barreiras que melhorem o aspeto estético de um espaço e que ao mesmo tempo contribuam para a mitigação de ruído é competência de um projetista, bem como, garantir que o meio ambiente não é prejudicado com a implementação de uma solução de mitigação.

Ao nível das faixas de rodagem das estradas, a manutenção do estado de conservação das estradas, a implementação de pneus com baixa emissão sonora, a introdução de pavimentos pouco ruidosos e sistemas de atenuação sonora associados, são as prioridades.

Já nos caminhos de ferro, sistemas que amortecem a vibração causada pela passagem do veículo ou a otimização das rodas, são desenvolvimentos futuros a ter em conta.

De facto, a mitigação de ruído deve ser feita a partir da fonte e, por isso, a introdução de veículos elétricos, na principal fonte de ruído (as estradas), é um passo importante não só para o ambiente, como para a melhoria da qualidade de vida dos cidadãos.

4.2 Trabalhos futuros

Como desenvolvimento deste trabalho sugere-se a análise de situações específicas, onde podem vir a ser implementadas estas medidas e a sua real eficácia. A título de exemplo, ao nível do ruído de tráfego ferroviário seria interessante fazer a avaliação do ruído aéreo e vibrações para situações críticas de atravessamento deste tráfego em cidades, de modo a quantificar o seu real impacto e fazer um levantamento de medidas de minimização deste ruído que são promovidas pelas entidades responsáveis por estas infraestruturas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Basner, M., Babisch, W., Davis, A., Brink, M., Clark, C., Janssen, S. and Stansfeld, S. (2014). “Auditory and non-auditory effects of noise on health”, *The Lancet*, 383(9925), pp.1325–1332.
- Blokland, G. e Graaf, D. (2012). “Measures on road traffic noise in the EU”, relatório preparado pelo M+P – consulting engineers para o Interest Group on Traffic Noise Abatement (IGNA), Amesterdão.
- Carlsson, U. (2003). “Noise and vibration aspects on railway goods transportation”. Report 0506E, MarcusWallenberg Laboratoriet, Suécia.
- CE@. <http://ec.europa.eu/environment/action-programme/>. Comissão Europeia (página internet oficial), União Europeia.
- CEM@ (2013). <http://www.cleanenergyministerial.org/Our-Work/Initiatives/Electric-Vehicles/Activities>. Clean Energy Ministerial (página internet oficial), Electric Vehicles Initiative, EU.
- Clausen, U., Doll, C., Franklin, F., Franklin, G., Heinrichmeyer, H., Kochsiek, J., Rothengatter, W., Sieber, N. (2012). “Reducing Railway Noise Pollution”, Estudo levado a cabo por Piero SOAVE, Policy Department Structural and Cohesion Policies e European Parliament, Bruxelas
- Costa, P. (2015). “Vibrações e Ruído Emitidos por Tráfego Ferroviário: Fenomenologia, Previsão e Mitigação”. Inserido no workshop sobre Ruído em meios de transporte: medição, modelação e mitigação, IteCons, Coimbra.
- CU@ (2010) <http://www.cityhush.eu/index.html>. City Hush Project (página internet oficial), União Europeia.
- D2SI@ (2008). <http://www.d2sint.com/services/railway-transport/vibration-mitigation-2/>. D2S International (página internet oficial), Heverlee.
- European Environmental Agency. Nugent, C.,Blanes, N., Fons, J., de la Maza, M., Ramos, M., Domingues, F., van Beek, A. e Houthuijs, D. (2014). “Noise in Europe 2014”, relatório da European Environment Agency (EEA) e os seus European Topic Centre on Air pollution and Climate Mitigation (ETC-ACM). Kongens Nytorv 6, Copenhaga, Dinamarca.
- General for Energy and Transport of European Commission (EC), (2001). “A study of European priorities and strategies for railway noise abatement”, EC, Bruxelles.
- Hanson, C., Towers, D., Meister, L. (2006). “Transit noise and vibration impact assessment”. Federal Transit Administration (FTA), Washington, DC.
- HOSANNA - HOListic and Sustainable Abatement of Noise by optimized combinations of Natural and Artificial means, (2013). “Novel Solutions for Quieter and Greener Cities”. HOSANNA project, developed by 13 partners, EU.

- J. Lelong and R. Michelet, “Passenger cars. Power unit and tyre-road noise, driving behaviour: what are the stakes?,” in *Inter.noise*, The Hague, 2001.
- Lakušić, S., Ahac, M. (2012). “Rail Traffic Noise and Vibration Mitigation Measures in Urban Areas”. *Tehnički vjesnik*, 19, 2(2012), pp.427-435.
- MAOTDR (2006). Decreto-Lei n.º 146/2006, Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional, Portugal.
- MAOTDR (2007). “Regulamento Geral do Ruído”. Decreto-Lei n.º 9/2007, Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional, Portugal.
- NP ISO 1996 (2011). “Descrição, Medição e Avaliação do Ruído Ambiente”. Instituto Português da Qualidade, Portugal.
- PA@ (2016). <http://portalacustica.info/cristais-sonicos/>. Portal Acústica, Cristais Sónicos: uma elegante tecnologia acústica.
- PECUE, 2002. “END-Environmental Noise Directive”. Diretiva 2002/49/CE, Parlamento Europeu e do Conselho, União Europeia
- PECUE, 2009. “Prescrições para homologação no que se refere à segurança geral dos veículos a motor, seus reboques e sistemas, componentes e unidades técnicas a eles destinados”. Diretiva 2009/661/CE, Parlamento Europeu e do Conselho, União Europeia.
- Pereira, A. (2015). “Ruído produzido pela nova geração de veículos híbridos e elétricos”. Inserido no workshop sobre Ruído em meios de transporte: medição, modelação e mitigação, IteCons, Coimbra.
- PTS@ (2010). <http://www.pandrol.com/>. Pandrol Track Systems (página internet oficial), International.
- RT@ (2008). <http://www.railway-technology.com>. Railway Technology (página internet oficial), London.
- Sandberg, U., Ejsmont, J. (2002). “Tire-Road Noise Reference Book”. Informex, Kisa.
- Sørensen, M., Ketzler, M., Overvad, K., Tjønneland, A. and Raaschou-Nielsen, O., (2014), “Exposure to road traffic and railway noise and postmenopausal breast cancer: A cohort study”. *International Journal of Cancer*, 134(11) pp. 2691–2698.
- Tadeu, A., Mateus, D., António, J., Godinho, L., Mendes, P. (2010). “Acústica Aplicada”. Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- TNO@ <https://www.tno.nl/media/2479/twins.pdf>. Toegepast Natuurwetenschappelijk Onderzoek (página internet oficial), Den Haag.
- UIC (2008). “Development of Action Plans for Railways; prepared for International Union of Railways”. International Union of Railways, International.
- US@ http://www.southampton.ac.uk/engineering/research/groups/dynamics/rail/rolling_railway_noise.page. Dynamics Group of Southampton University (página internet oficial), Southampton.
- UWM@ (1990). <https://www4.uwm.edu/cuts/noise/noiseb.htm>. University of Wisconsin-Milwaukee (página internet oficial), Noise Barrier Design Principles, Milwaukee.

- Verheijen, E., Jabben, J. (2010). “Effect of electric cars on traffic noise and safety”. Relatório do National Institute for Public Health and Environment, BA Bilthoven.
- Vienneau, D., Perez, L., Schindler, C., Probst-Hensch, N. and Röösl, M. (2013). “The relationship between traffic noise exposure and ischemic heart disease: a meta-analysis”, 42nd International Congress and Exposition on Noise Control Engineering, Proceedings of INTER-NOISE 2013, Innsbruck, pp. 5 070–5 076.
- WONROS@ (2013). <http://www.wonros.com/rail-dampers>. WONROS technology (página internet oficial), Nürnberg Rangierbahnhof.
- Working Group Railway Noise of the European Commission, 2003. “Position Paper on the European strategies and priorities for railway noise abatement”, Luxemburg.