



ISEL



Mitigação de Ruído e das Vibrações em Infraestruturas Rodoviárias

MIGUEL GUERREIRO GARCIA ALMEIDA BORGES
(Licenciado em Engenharia Civil)

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, na Área de Especialização de Vias de Comunicação e Transportes

Orientadora:

Licenciada, Especialista Luísa Ferreira Cardoso Teles Fortes

Júri:

Presidente: Doutor Pedro Miguel Soares Raposeiro da Silva

Vogais:

Licenciado, Especialista Armando do Carmo Martins

Licenciada, Especialista Luísa Ferreira Cardoso Teles Fortes

Setembro de 2024



Mitigação de Ruído e das Vibrações em Infraestruturas Rodoviárias

MIGUEL GUERREIRO GARCIA ALMEIDA BORGES
(Licenciado em Engenharia Civil)

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, na Área de Especialização de Vias de Comunicação e Transportes

Orientadora:

Licenciada, Especialista Luísa Ferreira Cardoso Teles Fortes, ISEL/DEC

Júri:

Presidente: Doutor Pedro Miguel Soares Raposeiro da Silva, ISEL/DEC

Vogais:

Licenciado, Especialista Armando do Carmo Martins

Licenciada, Especialista Luísa Ferreira Cardoso Teles Fortes, ISEL/DEC

Setembro de 2024

Agradecimentos

Ao concluir esta dissertação, como etapa final para o meu percurso académico, quero expressar a minha sincera gratidão a todos aqueles que contribuíram para a sua realização.

Agradeço à minha orientadora, Professora Luísa Ferreira Cardoso Teles Fortes, pela orientação, exigência, paciência e pela partilha de conhecimento que foi essencial para o desenvolvimento desta dissertação.

Agradeço à minha família, por todo o apoio e motivação que me deram ao longo de todo o meu percurso académico, em especial aos meus pais, pelos valores de dedicação, esforço e resiliência que me transmitiram.

Agradeço à minha namorada Inês, pelo apoio, paciência e motivação que foram essenciais durante esta etapa.

Por fim, mas não menos significativo, quero agradecer aos meus amigos e colegas que me acompanharam durante este percurso, em especial aos meus colegas do ISEL, pelo companheirismo, pelos desafios e pelas conquistas que partilhámos ao longo destes anos. Todos vocês foram fundamentais para o meu desenvolvimento pessoal e académico.

Declaração de integridade

Declaro que esta dissertação é o resultado da minha investigação pessoal e independente. O seu conteúdo é original e todas as fontes listadas nas referências bibliográficas foram consultadas e estão devidamente mencionadas no texto. Mais declaro que todas as referências científicas e técnicas relevantes para o desenvolvimento do trabalho estão devidamente citadas e constam das referências bibliográficas.

O autor

Miguel Almeida Borges

Lisboa, 23 de Outubro de 2024

RESUMO

As infraestruturas rodoviárias são fundamentais para o funcionamento e desenvolvimento civilizacional, servindo não só a população, como também para fins militares, industriais e comerciais. Com o crescimento da população, associado ao progresso tecnológico, tornou-se necessário aumentar o alcance e a capacidade de circulação rodoviária, aumentando consequentemente também alguns dos seus impactes negativos, tais como o ruído e as vibrações.

O ruído e as vibrações podem ser resultantes de diferentes ações nas estradas, podendo ser gerados pelo contacto pneu/pavimento, pelo próprio funcionamento do veículo ou pela componente aerodinâmica. Estes fenómenos podem causar distúrbios nas atividades diárias, problemas de saúde na população e até comprometer a integridade da própria infraestrutura.

As medidas de mitigação podem ser aplicadas na fonte do ruído, no percurso entre a fonte e o recetor ou no próprio recetor, existindo diferentes tipos de metodologias para mitigar o ruído e as vibrações nas infraestruturas rodoviárias.

O presente documento apresenta os princípios físicos que determinam o comportamento das ondas sonoras, referencia a legislação em vigor em Portugal para o ruído rodoviário, apresenta diferentes tipos de sistemas para a mitigação de ruído, tais como a redução de velocidade de circulação, os pavimentos de baixo ruído e as barreiras acústicas (pré-fabricadas e barreiras compostas por materiais naturais).

Para estes sistemas foram analisadas as suas características e os princípios de conceção, assim como a avaliação do seu desempenho face ao ruído e vibrações gerados nas infraestruturas rodoviárias.

De acordo com a análise efetuada concluiu-se que pavimentos de baixo ruído e barreiras acústicas são as soluções predominantes e que na maioria das situações são utilizadas em complementaridade, não devendo ser comparadas por si só, pois a sua metodologia de atuação e função é diferente. Para estes dois tipos de sistemas, foi também possível concluir que as características fundamentais para a otimização do seu desempenho são, a textura, a porosidade e o volume de vazios, no caso dos pavimentos, e a geometria (secção), a densidade e a rigidez no caso das barreiras.

PALAVRAS-CHAVE

Ruído rodoviário, ligação pneu-pavimento, barreira acústica, mistura betuminosa

ABSTRACT

Road infrastructures are fundamental for the functioning and development of civilization, serving not only the population but also for military, industrial, and commercial purposes.

With the population growth, associated with technological progress, it became necessary to increase the range and capacity of road infrastructures, consequently also increasing some of its negative impacts, such as noise and vibrations.

Noise and vibrations can result from different actions on the roads, being generated by tire/pavement contact, by the vehicle's own operation, or by the aerodynamic component.

These phenomena can cause disturbances in daily activities, health problems in the population, and even compromise the integrity of the infrastructure itself.

Mitigation measures can be applied at the noise source, along the path between the source and the receiver, or at the receiver itself, there are different types of methodologies for mitigating noise and vibration on road infrastructure.

This document presents the physical principles that determine the behaviour of sound waves, refers the legislation in force in Portugal regarding road noise, and describes the different types of noise mitigation systems, such as speed reduction, low-noise pavements and acoustic barriers (prefabricated and barriers made of natural materials).

The design principles and the characteristics of these systems were analysed, as was the assessment of their performance regarding the noise and vibrations generated by road infrastructures.

According to the analysis carried out, it was concluded that low-noise pavements and acoustic barriers are the predominant solutions and that in the majority of situations they are used in a complementary manner and should not be compared on their own, as their design methodology and purpose are different.

For these two types of systems, it was also possible to conclude that the fundamental characteristics for optimising their performance are texture, porosity and volume of voids for pavements, and geometry (section), density and rigidity for barriers.

KEYWORDS

Roadway noise, tyre-road noise, noise barrier, asphalt mixture

Índice

1.	Introdução.....	1
1.1	Enquadramento	1
1.2	Objetivos e motivação.....	2
1.3	Metodologia	3
1.4	Estrutura do Trabalho.....	4
2.	Ruído e Vibrações	5
2.1	Conceitos gerais sobre ruído e vibrações	5
2.2	Ruído estrutural.....	14
2.3	Origens do ruído, vibrações e formas de propagação.....	15
3.	Mitigação de Ruído e das Vibrações	21
3.1	Importância da mitigação de ruído e das vibrações.....	21
3.2	Legislação aplicável.....	26
4.	Medidas de Mitigação de Ruído e das Vibrações.....	31
4.1	Diminuição da velocidade de circulação.....	31
4.2	Pavimentos e misturas betuminosas	32
4.2.1	Comparação do desempenho acústico das camadas de desgaste flexíveis	46
4.2.2	Comparação do desempenho acústico das camadas de desgaste flexíveis em condições molhadas e secas.....	50
4.2.3	Manutenção de pavimentos	54
4.3	Barreiras acústicas.....	55
4.3.1	Geometria	58
4.3.2	Materiais.....	70
4.3.3	Posicionamento.....	92
4.3.4	Comparação de desempenho de barreiras acústicas de diferentes materiais	95
5.	Conclusões e Desenvolvimentos Futuros	101
	Revisão Bibliográfica	105

Índice de Figuras

Figura 2.1 – Representação da propagação de uma onda sonora.....	6
Figura 2.2 – Comprimento de onda e amplitude de uma onda sonora.....	7
Figura 2.3 – Nível de pressão sonora contínuo equivalente	10
Figura 2.4 – Emissão de um som: potência e intensidade sonora.....	11
Figura 2.5 - Difração de ondas sonoras	12
Figura 2.6 – Reflexão de uma onda sonora	13
Figura 2.7 - Reverberação de ondas sonoras	14
Figura 2.8 – Simulação do ruído aerodinâmico num veículo	15
Figura 2.9 – Mecanismos mecânicos de emissão de ruído pneu/pavimento	16
Figura 2.10 - Mecanismos aerodinâmicos de emissão de ruído pneu/pavimento	17
Figura 2.11 – Níveis sonoros produzidos pela circulação de veículos a diferentes velocidades	18
Figura 3.1 – Relação entre o nível sonoro e o nível de incómodo associado à circulação em diferentes tipos de pavimento.....	22
Figura 3.2 – Relação entre a velocidade de tráfego e o nível de incómodo associado para diferentes tipos de pavimento.....	23
Figura 3.3 - Limites de nível de pressão sonora para diferentes tipos de ruído.....	25
Figura 4.1 – Comprimento de onda correspondente ao nível de textura.....	33
Figura 4.2 – Provete de mistura porosa	35
Figura 4.3 – Agregados relativos a mistura betuminosa rugosa	35
Figura 4.4 – Carote de pavimento com camada de desgaste de espessura fina	37
Figura 4.5 - Níveis sonoros em função da velocidade – Mistura contínua 1	40
Figura 4.6 - Níveis sonoros em função da velocidade – Mistura contínua 2	41
Figura 4.7 - Níveis sonoros em função da velocidade – Mistura descontínua.....	41
Figura 4.8 – Granulometria das misturas com argila expandida, com cortiça e a mistura betuminosa de controlo ensaiadas	43
Figura 4.9 – Percentagem de som absorvido pelo pavimento composto por mistura betuminosa com cortiça para um espetro de frequências.....	44
Figura 4.10 – Percentagem de som absorvido pelo pavimento composto por mistura betuminosa com argila expandida para um espetro de frequências	44
Figura 4.11 – Pavimento com ranhuração longitudinal.....	45
Figura 4.12 – Execução de ranhuração transversal em pavimento rígido	46
Figura 4.13 - Níveis sonoros associados a cada tipo de mistura betuminosa em função das velocidades	48
Figura 4.14 – Nível de ruído gerado por tráfego ligeiro em camadas de desgaste de misturas densa e porosa em condições secas e molhadas à velocidade de 50 e 100 km/h.....	52
Figura 4.15 – Nível sonoro em pavimentos de mistura de betão betuminoso com diferentes anomalias...	55
Figura 4.16 – Esquema de estrutura de barreira pré-fabricada	56
Figura 4.17 – Esquema do comportamento de ondas sonoras que incidem numa barreira acústica.....	57
Figura 4.18 – Tipos de topos de barreiras acústicas	59
Figura 4.19 – Impedimento de propagação de ondas causado por barreira com topo “T”	60
Figura 4.20 – Comparação da influência de uma secção e da geometria de uma barreira para ondas sonoras.....	60
Figura 4.21 – Barreira acústica com topo em forma de T com material poroso na superfície do topo	61
Figura 4.22 – Barreira acústica com topo em formato de cogumelo	63
Figura 4.23 – Topo de barreira acústica cilíndrica com secção de roda de água	64
Figura 4.24 – Fenómeno de reflexão de ondas sonoras em barreiras acústicas	64
Figura 4.25 – Barreira acústica com material de absorção sonora	65
Figura 4.26 – Cenários de inclinação de barreiras verticais	66
Figura 4.27 – Efeito de sombreamento criado pelo comprimento de uma barreira	67
Figura 4.28 – Efeito de sombreamento criado pela barreira com extremidades modificadas	68
Figura 4.29 – Túnel para isolamento de ruído em Génova.....	69
Figura 4.30 – Barreira acústica em consola.....	69
Figura 4.31 – Barreira de madeira com vegetação em meio urbano.....	71
Figura 4.32 – Barreira de betão armado betonada “in situ”	72
Figura 4.33 – Barreira acústica de betão com padrão superficial	73
Figura 4.34 – Barreira de betão armado	73

Figura 4.35 – Barreira acústica metálica	75
Figura 4.36 – Esquema de secção de barreira metálica absorvente	76
Figura 4.37 – Barreira de alvenaria	77
Figura 4.38 – Barreira acústica de madeira	78
Figura 4.39 – Barreira acústica de madeira em rua residencial	79
Figura 4.40 – Barreira acústica com painéis de acrílico curvados.....	80
Figura 4.41 - Barreira acústica de acrílico transparente com padrão de aves	81
Figura 4.42 – Detalhe de barreira de betão armado com painéis com adição de fibra de madeira	82
Figura 4.43 – Esquema de bio-barreira vertical com fixação de vegetação com estrutura em formato de “A”	86
Figura 4.44 – Esquema de bio-barreira estilo caixa de solo ou <i>box wall</i>	87
Figura 4.45 – Esquema de bio-barreira estilo com salgueiro ou <i>willow wall</i>	88
Figura 4.46 – Esquema de bio-barreira estilo blocos sobrepostos ou <i>stack wall</i>	89
Figura 4.47 – Esquema comparativo do espaço lateral necessário para uma bio-barreira convencional e para um talude artificial.....	90
Figura 4.48 – Esquema da utilização de taludes como barreiras acústicas	91
Figura 4.49 – Esquema comparativo do espaço lateral necessário para uma barreira vertical convencional e para um talude artificial	92
Figura 4.50 – Esquema de colocação de barreira vertical em infraestrutura rodoviária	93
Figura 4.51 - Esquema de colocação de barreira vertical em infraestrutura rodoviária em zona de escavação.....	93
Figura 4.52 – Esquemas de configurações de barreiras acústicas	95
Figura 4.53 – Desempenho acústico de diferentes materiais utilizados para barreiras acústicas	97
Figura 4.54 – Comparação do desempenho acústico e densidade característica de diferentes materiais utilizados para barreiras acústicas	99

Índice de Tabelas

Tabela 3.1 – Valores limites definidos para ruído para cada tipo de zona.....	27
Tabela 4.1 – Classificação da macrotextura no ensaio de mancha de areia.....	38
Tabela 4.2 – Características das misturas betuminosas testadas.....	39
Tabela 4.3 – Variação do nível sonoro dos diferentes pavimentos a diferentes velocidades.....	42
Tabela 4.4 – Níveis sonoros associados a cada tipo de mistura betuminosa betuminosas em função das velocidades.....	47
Tabela 4.5 – Variação do nível de ruído produzido por cada mistura em função da velocidade face à mistura betuminosa convencional BB.....	49
Tabela 4.6 – Comparação do desempenho acústico da mistura MBA BBA com diferente dimensão de agregado em função da velocidade.....	50
Tabela 4.7 – Características das misturas ensaiadas.....	51
Tabela 4.8 – Nível de ruído em camadas de desgaste com misturas densa e porosa em diferentes condições de aderência e para diferentes velocidades.....	51
Tabela 4.9 – Variação do nível sonoro em plataforma molhada face a seca de misturas densa e porosa para diferentes velocidades.....	52
Tabela 4.10 - Variação do nível sonoro devido à variação de velocidade de 80 para 110 km/h para as condições seca e molhada de misturas densa e porosa.....	53
Tabela 4.11 – Espessura e densidade dos materiais testados.....	97

Lista de Símbolos e Siglas

Alfabeto romano

A – Amplitude
b – Largura
c – Velocidade do som
f – Frequência
I – Intensidade sonora
 L_A – Nível de pressão sonora
 L_{Aeq} – Nível de pressão sonora equivalente, ponderada em “A”
 L_{Aeq} (diário) – Nível de pressão sonora equivalente de um conjunto de dados correspondente a um período do dia durante um ano, ponderada em “A”
 L_{Aeq} (mensal) – Nível de pressão sonora equivalente de um conjunto de dados correspondente ao mês com maior emissão de som, ponderada em “A”
 L_{Amax} – Média dos valores máximos de níveis de pressão sonora medidos durante um período de tempo, ponderado em “A”
 L_{AR} – Nível de pressão sonora contínua equivalente durante um período, ponderada em “A”
 L_d – Nível de pressão sonora durante um conjunto de períodos diurnos
 L_e – Nível de pressão sonora durante um conjunto de períodos ao entardecer
 L_{den} – Nível de pressão sonora durante um conjunto de períodos diurno-entardecer-noturno
 L_n – Nível de pressão sonora durante um conjunto de períodos noturnos
 L_{Ref} – Nível de pressão sonora de referência
 L_p – Nível de pressão sonora
n – Porosidade
P – Potência sonora
p – Pressão sonora instantânea
 p_A – Nível de pressão sonora medido
 p_0 – Nível de pressão sonora de referência
r – Distância entre fonte e recetor
 r_{Ref} – Distância de referência
T – Período de tempo
t1 – Tempo de início da medição
t2 – Tempo final da medição
v – Velocidade

Alfabeto grego

λ – Comprimento de onda

Siglas

AIA – Avaliação de Impacte Ambiental

BB – Mistura betuminosa convencional
BBr – Mistura betuminosa rugosa
BD – Mistura betuminosa densa
BD molhada – Mistura betuminosa densa em condições molhadas
BD seca – Mistura betuminosa densa em condições secas
BDr – Mistura betuminosa drenante
BP – Percentagem de betume por peso total
BP molhada – Mistura betuminosa porosa em condições molhadas
BP seca – Mistura betuminosa porosa em condições secas
CCDR - Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional
CPB – Controlled Pass-By
CPX – Close Proximity Method
DCAPE – Decisão sobre a Conformidade Ambiental
DIA – Declaração de Impacte Ambiental
EIA – Estudo de Impacte Ambiental
HS – Profundidade média de areia no ensaio de mancha de areia
LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil
MAS – Dimensão máxima do agregado
MBA BBA10 – Mistura betuminosa com betume modificado com borracha e dimensão de agregado máxima de 10 mm
MBA BBA12 – Mistura betuminosa com betume modificado com borracha e dimensão de agregado máxima de 12 mm
MDa – Mistura betuminosa em espessura fina de granulometria aberta
MDf – Mistura betuminosa em espessura fina de granulometria fechada
PMMA – Polimetilmetacrilato
RP – Percentagem de borracha por peso total
SAMI – Stress Absorbing Membrane Interlayer
SBS – Estireno-Butadieno-Estireno
SI – Sistema Internacional
SMA – Stone Mastic Asphalt

1. Introdução

1.1 Enquadramento

As infraestruturas rodoviárias são elementos vitais para a circulação de pessoas e bens, estando hierarquicamente organizadas e diferenciadas de modo a cumprir as suas funções tanto de interligação entre aglomerados populacionais (estradas) como de acesso no interior desses mesmos aglomerados (arruamentos).

A escolha da sua localização e do seu traçado são de grande importância, pois irão influenciar não só a vida dos utilizadores como também toda a área envolvente, tendo impactos diversificados nesta entre os quais se destaca o ruído originado pela circulação dos veículos, habitualmente designado por poluição sonora.

O ruído produzido pelo tráfego rodoviário tem aumentado fruto do crescimento dos grandes centros urbanos e do conseqüente aumento do número de veículos em circulação.

A poluição sonora produzida tem efeitos negativos nos seres vivos, podendo causar distúrbios nas atividades diárias das populações, assim como originar problemas de saúde. As vibrações induzidas pelo tráfego também podem criar problemas nas infraestruturas, gerando o ruído estrutural (que afeta a sua integridade estrutural), podendo causar instabilidade na própria estrutura e ainda no meio onde a mesma se insere.

Estes efeitos negativos do ruído e das vibrações causados pela circulação dos veículos já são conhecidos desde a época do Império Romano em que foram testadas medidas de redução de ruído, nomeadamente a limitação da circulação do número de carruagens durante o período diurno, medida que se tornou popular na época, uma vez que o ruído gerado era indesejado e incomodativo (Knapton, 1996).

Os romanos também foram os primeiros a criar uma estrutura de pavimento mais profunda, esta era definida por uma camada de fundação composta por agregados de grandes dimensões, sobre esta era colocada uma camada de agregados de dimensão intermédia aglutinados com cal e sobre esta uma camada de agregados de pequena dimensão, em que a camada de desgaste era constituída por blocos de basalto (Miranda, 2023).

Este avanço tecnológico criou um novo problema, o aumento do ruído produzido pela circulação das carruagens sobre este tipo de pavimento era superior ao produzido nos caminhos em terra batida.

Ao longo do tempo a tecnologia utilizada nos veículos motorizados foi progredindo e os tipos de ruído criados também. Atualmente um veículo que circule numa estrada produz um efeito sonoro com a sua circulação devido ao ruído aerodinâmico, ruído do funcionamento do motor e o ruído produzido pelo contacto do pneu/pavimento.

As tecnologias atualmente utilizadas para atenuar estes tipos de ruído são resultantes de um longo período de desenvolvimento, com a aplicação de novas metodologias associadas a novos materiais com melhores resultados na ótica da minimização de ruído ao nível dos pavimentos e das barreiras acústicas.

1.2 Objetivos e motivação

O presente Trabalho Final de Mestrado trata a mitigação de ruído e das vibrações produzidos pela circulação do tráfego em infraestruturas rodoviárias, apresentando os conceitos sobre a origem, natureza e comportamento de ruído e das vibrações, assim como a importância da ação de atenuação, a legislação existente que regula a produção de ruído rodoviário a nível nacional e os sistemas de mitigação, as suas diferentes abordagens, para limitar o impacto e as repercussões na envolvente.

O estudo deste tema foi motivado pelo interesse em aprofundar o conhecimento sobre o tema dos sistemas de mitigação de ruído e das vibrações, pela curiosidade sobre a tecnologia que é utilizada nos mesmos e pela importância que estes sistemas têm para a minimização de um dos impactos negativos do tráfego rodoviário.

O facto de estes conteúdos serem abordados apenas de forma preliminar no programa curricular do Curso de Mestrado, também contribuiu para motivar a escolha deste tema, tendo em consideração que estes sistemas de mitigação de ruído são uma ferramenta importante para a redução de um impacto negativo originado pela circulação do tráfego rodoviário

A elaboração do presente Trabalho Final de Mestrado tem subjacentes os seguintes objetivos:

- Caracterizar os princípios físicos do ruído e das vibrações;
- Caracterizar e analisar as propriedades dos diversos sistemas de mitigação de ruído rodoviário e os princípios da sua conceção:

- Compreender a importância da mitigação de ruído e caracterizar as possíveis consequências;
- Apresentar a legislação em vigor em Portugal face à produção de ruído, o seu controlo e fiscalização;
- Analisar o desempenho na redução de ruído resultante da circulação de veículos por meio de camadas de desgaste constituídas por misturas betuminosas diferentes;
- Analisar o desempenho na redução de ruído resultante da circulação de veículos por meio de camadas de desgaste em condições molhadas e secas;
- Analisar o desempenho na redução de ruído resultante da circulação de veículos por meio de diferentes sistemas de barreiras acústicas;
- Face às análises anteriores concluir sobre os sistemas de mitigação de ruído mais adequados para infraestruturas rodoviárias.

1.3 Metodologia

De forma a concretizar os objetivos propostos anteriormente, foi necessário adotar uma metodologia que estabelecesse os procedimentos a adotar durante o desenvolvimento do Trabalho Final de Mestrado, e que podem ser sintetizados da seguinte forma:

- Pesquisa bibliográfica sobre sistemas de mitigação de ruído;
- Contacto com empresas fabricantes de sistemas de mitigação de ruído para obtenção de documentação sobre os produtos no mercado;
- Pesquisa e análise da legislação sobre produção de ruído rodoviário;
- Análise da documentação obtida através da pesquisa e comparação dos sistemas de mitigação de ruído;
- Análise e comparação de resultados de ensaios de desempenho de misturas betuminosa para diferentes velocidades de circulação e diferentes características de aderência;
- Análise e comparação de resultados de ensaios de desempenho de barreiras acústicas de diferentes materiais;
- Conclusões e considerações futuras.

As análises comparativas sobre desempenho acústico das soluções em estudo foram elaboradas através de dados obtidos em ensaios conduzidos sobre as mesmas condições e com igual metodologia, de modo a garantir que os dados são coerentes e comparáveis.

1.4 Estrutura do Documento

O presente Trabalho Final de Mestrado está estruturado em cinco capítulos, cujo conteúdo e objetivo se descreve seguidamente:

- **Capítulo 1 – Introdução**

Introdução do tema em estudo, realização do seu enquadramento, definição dos objetivos e da metodologia e descrição da motivação, assim como da estrutura do documento.

- **Capítulo 2 – Ruído e Vibrações**

Apresentação dos conceitos gerais sobre ruído e vibrações, descrição das propriedades físicas e do comportamento das ondas sonoras, descrição do conceito de ruído estrutural, indicação das fontes de geração de ruído, das vibrações e do seu modo de propagação.

- **Capítulo 3 – Mitigação de Ruído e das Vibrações**

A importância da mitigação de ruído e vibrações, assim como a apresentação da legislação aplicável às infraestruturas rodoviárias em Portugal.

- **Capítulo 4 – Medidas de Mitigação de Ruído e das Vibrações**

Descrição dos sistemas de mitigação de ruído, análise das suas características e dos princípios da sua conceção, comparação dos desempenhos acústicos dos mesmos, assim como apresentação de outras medidas que podem ser aplicadas para o mesmo efeito.

- **Capítulo 5 – Conclusões**

Apresentação das principais conclusões do trabalho realizado e referência às perspetivas futuras sobre os sistemas de minimização analisados.

2. Ruído e Vibrações

O ruído e as vibrações são fenômenos que provêm de uma mesma origem, a sua diferença advém da forma como são sentidos pelos recetores e pelo impacto que provocam numa pessoa ou objeto.

Neste capítulo são apresentados os conceitos característicos de vibrações, ruído, som, frequência, amplitude, comprimento de onda, período, nível de pressão sonora, intensidade e potência sonora.

A partir dos conceitos característicos é possível compreender o modo de propagação das ondas sonoras e o seu comportamento devido ao contacto com diferentes obstáculos.

2.1 Conceitos gerais sobre ruído e vibrações

Neste subcapítulo são abordados conceitos físicos sobre o som e sobre as vibrações.

As vibrações são criadas pela oscilação repetida de um objeto e são transmitidas no ar, esta transmissão provoca uma variação de pressão que gera uma onda sonora, ou seja, é gerado um som (da Silva Santos, 2007).

O ruído é algo não desejado ou não apelativo aos recetores, que pode causar incómodo e reações adversas.

- **Som**

Som é a definição dada a uma onda sonora detetada por um ouvido recetor, criada por uma variação de pressão produzida e transmitida por um meio de propagação. O meio de propagação deve ser físico, podendo tomar um dos três estados da matéria, sólido, líquido ou gasoso, dado que o som é uma onda mecânica.

O som é definido pela sua frequência, intensidade e timbre.

A intensidade (I) é medida pela energia que uma onda sonora transfere e permite distinguir um som fraco de um forte.

O timbre permite distinguir dois sons com a mesma frequência e intensidade produzidos por duas fontes sonoras diferentes. Esta distinção é permitida pelos harmônicos que acompanham o som fundamental, um exemplo disto é tocar a mesma nota musical com

uma guitarra e com um violoncelo e reconhecer qual foi o instrumento que produziu cada um dos sons (Padua et al., 2023).

A distinção de som de ruído é feita por um recetor, um som é algo agradável ou até mesmo indiferente enquanto um ruído é um som desagradável ou incomodativo que interfere com o bem-estar do recetor (I. S. Duarte, 2015).

Uma onda sonora pode ser definida por duas características, a frequência e o comprimento de onda (Bistafa, 2011).

Na Figura 2.1 está representada a propagação de uma onda sonora.

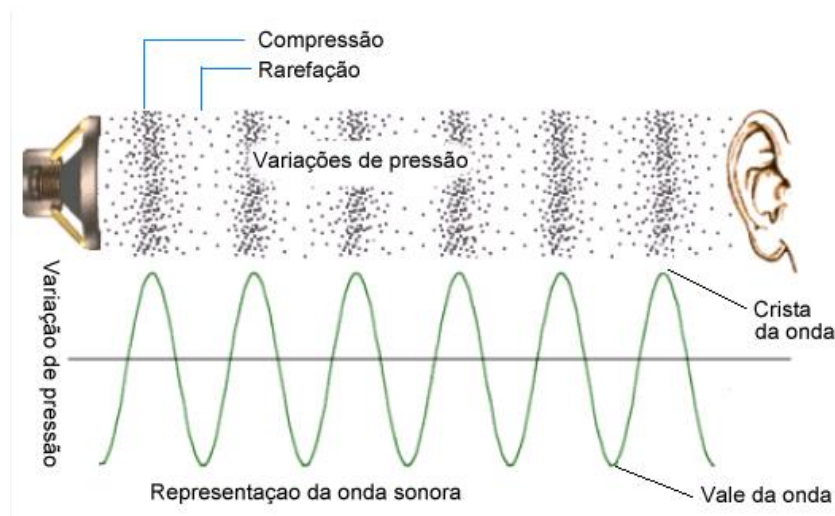


Figura 2.1 – Representação da propagação de uma onda sonora (Fq.Pt, 2023)

- **Frequência, amplitude, comprimento de onda e período**

A frequência (f) é uma grandeza que representa o número de vibrações por segundo, sendo a sua expressão apresentada em (2.1) (Padua et al., 2023).

$$f = 1/T \quad (2.1)$$

Em que:

f – frequência (Hz);

T – período de tempo (s).

A amplitude (A) é o valor máximo, positivo ou negativo, que uma onda alcança. O ponto máximo positivo é denominado de crista e o ponto máximo negativo de vale.

O comprimento de onda (λ) é a distância medida entre dois pontos com as mesmas características em duas ondas consecutivas, por norma são utilizados os pontos de crista ou de vale.

A expressão de cálculo do comprimento de onda é apresentada em (2.2) (Padua et al., 2023).

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2.2)$$

Em que:

λ – comprimento de onda (m);

c – velocidade do som (m/s);

f – frequência (Hz).

O período de um ciclo de onda é caracterizado pelo inverso do valor da frequência (Costa et al., 2023), sendo a respetiva expressão apresentada em (2.3) (Padua et al., 2023).

$$T = 1/f \quad (2.3)$$

Em que:

T – período (s);

f – frequência (Hz).

Na Figura 2.2 são representadas as grandezas definidas anteriormente, o comprimento de onda e a amplitude de uma onda sonora.

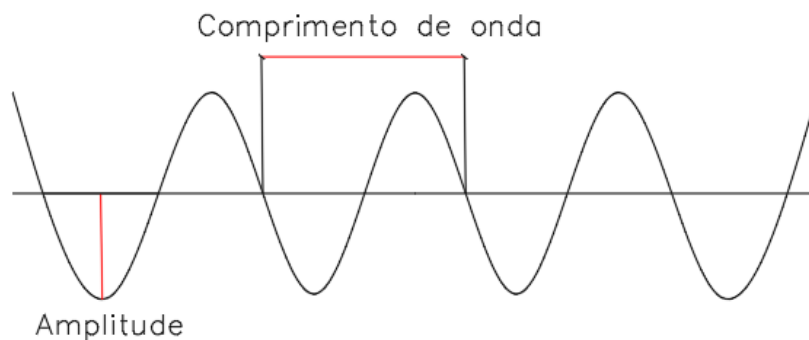


Figura 2.2 – Comprimento de onda e amplitude de uma onda sonora

• **Nível de pressão sonora**

O nível de pressão sonora (L_p) é a grandeza que define a variação da pressão do ar causada por uma onda sonora.

A expressão de cálculo do nível de pressão sonora está apresentada em (2.4) (da Silva Santos, 2007).

$$L_p = 10 \log 10 \left(\frac{p^2}{p_0^2} \right) \quad (2.4)$$

Em que:

- L_p – nível de pressão sonora (dB);
- p – nível de pressão sonora instantânea (Pa);
- p_0 – nível de pressão de referência (Pa).

A pressão sonora de referência tem o valor de 2×10^{-5} Pa (da Silva Santos, 2007).

Definindo a variação da pressão sonora é possível caracterizar o modo como um ser humano ouve um som e como sente quanto a este, permitindo classificá-lo como um som agradável ou como um ruído.

A NP ISO 1996-1 (2019) é a norma que define as grandezas fundamentais e métodos de avaliação acústica em Portugal e os indicadores utilizados para a verificação dos limites de ruído. Os indicadores são:

- Nível de ruído diurno-entardecer-noturno, L_{den} ;
- Nível de ruído noturno, L_n ;
- Nível de pressão sonora contínuo equivalente ponderado em “A” mensal e diário $L_{Aeq(mensal)}$ e $L_{Aeq(diário)}$;
- Nível de pressão sonora contínuo equivalente, L_{AR} (Matos et al., 2020).

O nível de ruído diurno-entardecer-noturno, L_{den} , indica o ruído referente ao incómodo global, medido durante um conjunto de períodos diurnos, ao entardecer e noturnos durante um ano (Matos et al., 2020).

O L_{den} é calculado utilizando a expressão (2.5) (Matos et al., 2020).

$$L_{den} = 10 \log \left[\frac{1}{24} \left(13 * 10^{\frac{L_d}{10}} + 3 * 10^{\frac{L_e+5}{10}} + 8 * 10^{\frac{L_n+10}{10}} \right) \right] \quad (2.5)$$

Em que:

L_d – nível de pressão sonora contínua equivalente durante um conjunto de períodos diurnos (dB);

L_e – nível de pressão sonora contínua equivalente durante um conjunto de períodos ao entardecer (dB);

L_n – nível de pressão sonora contínua equivalente durante um conjunto de períodos noturnos (dB).

O nível de ruído noturno, L_n , representa o nível sonoro equivalente para o conjunto de períodos noturnos medidos durante um ano (Matos et al., 2020).

Existem também os indicadores de nível de ruído para os períodos diurno e ao entardecer, porém não fazem parte dos requisitos para limite de ruído normativos.

O nível de pressão sonora contínuo equivalente ponderado segundo a curva “A”, L_{Aeq} , representa o indicador L_{AR} .

Esta ponderação altera certas frequências de modo representar uma aproximação mais fidedigna ao que um ouvido humano iria ouvir, havendo um destaque para as frequências na gama de 1 a 4 kHz, gama a que o ouvido humano é particularmente sensível (Svantek.Com, 2024).

O indicador normativo L_{Aeq} (diário) utiliza um conjunto de dados correspondentes a um dos períodos do dia durante um ano e o L_{Aeq} (mensal) utiliza o conjunto de dados correspondentes ao mês com maior emissão de ruído (Matos et al., 2020).

O nível de pressão sonora contínuo equivalente, L_{AR} , indica o valor da média de energia dos níveis de pressão que ocorreram durante um período de dia, entardecer ou noite. Este indicador representa a energia sonora emitida durante o período como se fosse um som constante (NI.Com, 2023).

Para melhor elucidar este conceito, na Figura 2.3 apresenta-se um gráfico com um exemplo que compara um nível de pressão sonora captado e o nível de pressão sonora contínuo equivalente, que toma um só valor de pressão, igual à média de valores das pressões captadas durante um período de tempo, neste caso entre t1 e t2.

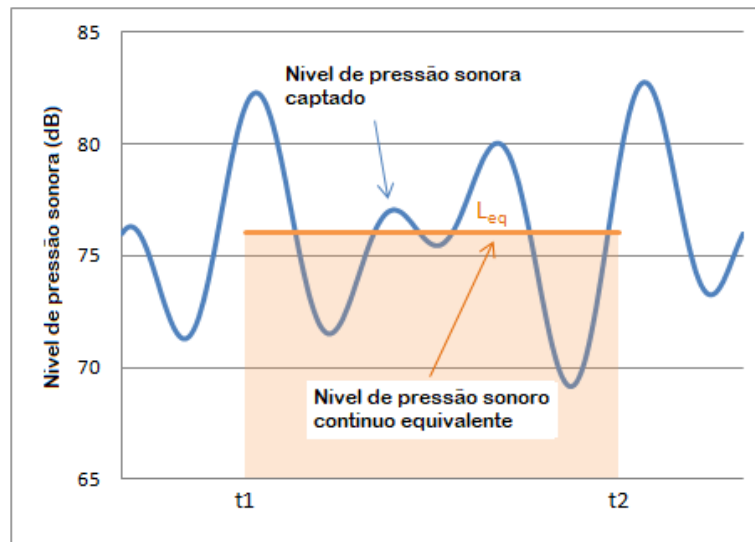


Figura 2.3 – Nível de pressão sonora contínuo equivalente (adaptado de NI.Com, 2023)

Muitas vezes o indicador L_{AR} surge com a designação de L_{eq} .

O L_{AR} é calculado utilizando a expressão (2.6) (NI.Com, 2023).

$$L_{AR} = 10 \log \left(\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} \frac{p_A^2}{p_0^2} dt \right) \quad (2.6)$$

Em que:

L_{AR} – nível de pressão sonora contínuo equivalente durante um período (dB);

p_0 – nível de pressão sonora de referência (Pa);

p_A – nível de pressão sonora medido (Pa);

t_1 – tempo de início de medição (s);

t_2 – tempo de finalização de medição (s).

Segundo a norma NP ISO 1996-1 (2019) todos os indicadores descritos à exceção do L_{AR} , devem ser ponderados segundo a curva “A” para efeitos de regulamentação.

Outro indicador importante para efeitos de análise é o L_{Amax} , este representa a média dos valores máximos de níveis de pressão sonoros medidos durante um período de tempo e é ponderado segundo a curva “A”.

- **Intensidade e potência sonora**

A intensidade sonora (I) é definida como a média de energia sonora que atravessa uma área unitária perpendicularmente na unidade de tempo, no Sistema Internacional (SI) é medida em watts por metro quadrado (W/m^2) (Bistafa, 2011).

A potência sonora (P) define uma quantidade de energia sonora que é emitida e transmitida numa determinada área durante um certo período de tempo, é medida no Sistema SI em watts (W).

A potência sonora e o nível de pressão sonora são grandezas que estão interligadas, a intensidade sonora caracteriza a potência de um som que atravessa uma área limitada (Costa et al., 2023).

Na Figura 2.4 está esquematizada a emissão de um som e a potência a que este é transmitido no ar, num plano afastado da fonte está caracterizada a intensidade sonora, assim como a potência que é transmitida através de uma área limitada de um plano no espaço.

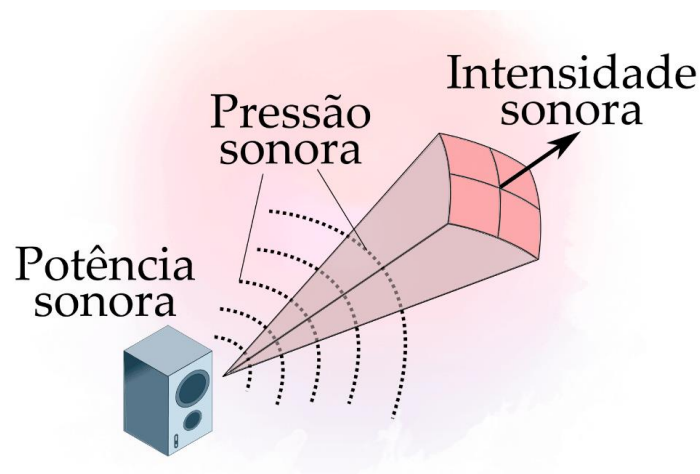


Figura 2.4 – Emissão de um som: potência e intensidade sonora (adaptado de (INAD Brasil, 2021))

- **Propagação de ondas sonoras**

A propagação de ondas sonoras pode ser caracterizada segundo diferentes tipos de comportamentos sendo eles a refração, a difração, a difusão, a reflexão, a reverberação e o eco.

A refração de ondas sonoras é o fenômeno onde uma onda transita de um meio para outro e altera a velocidade de propagação e o comprimento de onda de modo. Nesta transição o único parâmetro da onda que se mantém é a frequência.

A mudança de meio induz uma velocidade de propagação de onda própria diferente do meio anterior e causa uma mudança do comprimento de onda (Costa et al., 2023).

A expressão de cálculo da velocidade de propagação pode ser verificada em (2.7) (Padua et al., 2023).

$$v = \lambda \cdot f \quad (2.7)$$

Em que:

- v – velocidade (m/s);
- λ – comprimento de onda (m);
- f – frequência (Hz).

A difração de ondas sonoras é o fenômeno onde uma onda passa por um obstáculo se este tiver uma largura menor do que o comprimento de onda, caso contrário um recetor do lado oposto pode receber o som. Porém o obstáculo irá fazer surgir um efeito “sombreador” e o som captado ser recebido com diferentes características às emitidas (Costa et al., 2023).

Este fenômeno pode ser observado na Figura 2.5.

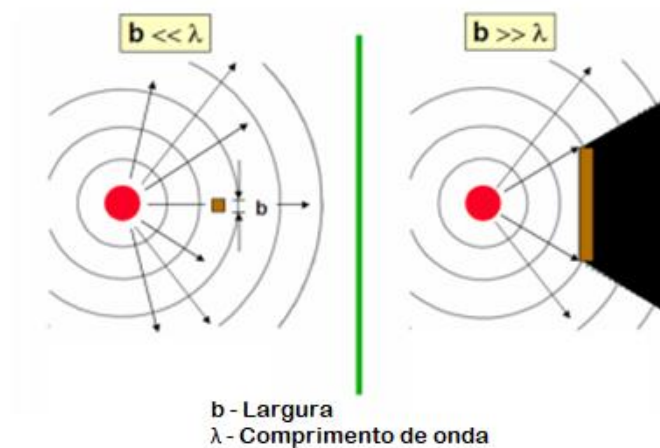


Figura 2.5 - Difração de ondas sonoras (adaptado de Brüel & Kjaer, 2023)

A difusão de ondas sonoras é fenômeno em que um som é emitido e se dirige em todas as direções ao redor da fonte que o permitam. O efeito causado pela passagem das ondas por uma fenda, caso esta tenha uma largura menor que o comprimento de onda

fará com que o som seja irradiado do mesmo modo como foi irradiado da fonte sonora inicial.

Caso a largura seja maior que o comprimento de onda, o som irá sofrer uma alteração no modo de propagação e irá soar de forma diferente face à emissão inicial (Costa et al., 2023).

A difusão pode também ocorrer com a alteração do padrão de propagação das ondas devido a interação com superfícies irregulares.

A reflexão é o comportamento no qual uma onda sonora se dirige na direção de uma superfície, embate e é refletida na direção oposta à que se dirigia. Este fenómeno tem várias condicionantes tais como o ângulo de incidência, a frequência e também as características da superfície obstáculo. Pode haver também uma absorção por parte do obstáculo, porém este acontecimento está dependente da capacidade de absorção da superfície.

A direção para onde a onda é refletida é definida pelo tipo de superfície e pelo ângulo de incidência. Este comportamento pode ser observado na Figura 2.6.

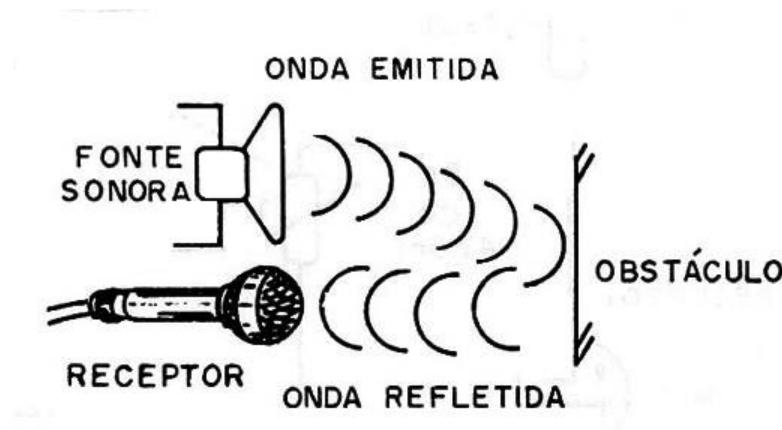


Figura 2.6 – Reflexão de uma onda sonora (adaptado de INCB.Com, 2023)

A reverberação descreve o fenómeno em que uma fonte emite um som e este se propaga na direção de um recetor que o ouve e que instantes depois volta a ouvir o mesmo som, devido a este ter sido refletido numa superfície da envolvente. O segundo som é captado enquanto o primeiro está a ser ouvido, ou seja, há uma superposição de sons (Costa et al., 2023).

A Figura 2. 7 pretende ilustrar o fenómeno de reverberação das ondas sonoras.

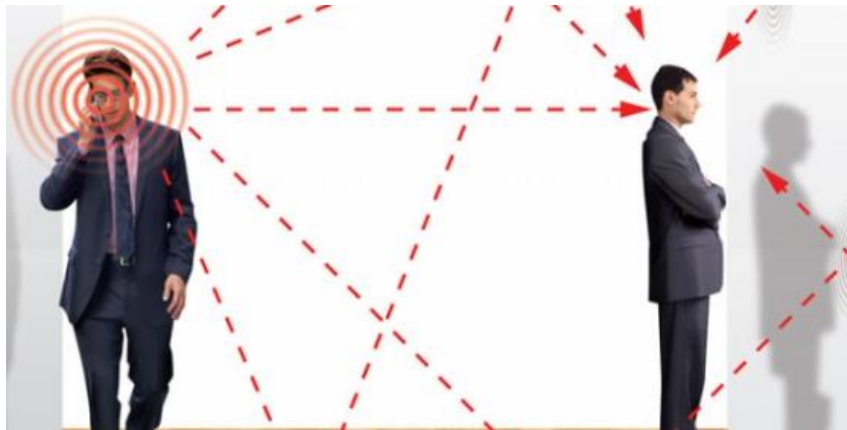


Figura 2. 7 - Reverberação de ondas sonoras (Russel, 2015)

O eco é um acontecimento onde é emitido um som e este é refletido em obstáculos e é recebido de volta uma ou mais vezes.

Este fenómeno pode parecer semelhante à reverberação, a diferença é que numa reverberação há superposição de sons recebidos e no eco não. Um exemplo deste fenómeno é o batimento de palmas pelo ser humano, onde as ondas sonoras produzidas se deslocam até incidirem na superfície de um obstáculo e são refletidas de volta para a fonte que as produziu.

2.2 Ruído estrutural

O ruído estrutural consiste no som gerado por uma vibração que se propaga através de elementos de uma estrutura, devido a uma perturbação criada por uma ação de movimento de um veículo na envolvente ou por um impacto direto na estrutura. Ou seja, a característica fundamental que distingue o ruído estrutural é o meio de propagação da vibração ser um elemento interior de uma estrutura.

Este é um ruído de baixa frequência na ordem dos 16 a 250 Hz e também é comum apelidá-lo de ruído re-radiado devido ao seu meio de transmissão não ser o meio onde foi inicialmente originado (Mendes & Silva, 2002).

Este tipo de vibrações geradas por ação do tráfego rodoviário ou outros tipos de infraestruturas de vias de comunicação necessitam que sejam desenvolvidas metodologias de mitigação e/ou proteção das infraestruturas devido à sua natureza de constante passagem de veículos que desencadeiam este fenómeno sucessivamente.

O ruído estrutural induz um efeito de fadiga nas estruturas que pode afetar a integridade estrutural e causar instabilidade nos elementos de suporte, arriscando a perda total de segurança.

Para além dos danos causados na própria infraestrutura rodoviária, o edificado na sua envolvente também pode sofrer deste tipo de danos estruturais.

2.3 Origens do ruído, vibrações e formas de propagação

O ruído rodoviário pode ser originado por três tipos de fontes, o ruído produzido pela ligação pneu/pavimento, pelo funcionamento do motor e pelo ruído aerodinâmico, gerado pela resistência do ar ao movimento do veículo.

É importante notar que cada uma destas fontes contribui de forma diferente para o ruído total produzido.

Os três tipos de fontes geram ruído de diferentes grandezas dependendo de certos fatores, conforme se descreve seguidamente.

O ruído aerodinâmico varia conforme a velocidade de circulação e com o formato da carroçaria do veículo. O nível sonoro gerado aumenta à medida que a velocidade aumenta e quando a forma da carroçaria é menos aerodinâmica.

Na Figura 2.8 é possível observar a simulação do ruído aerodinâmico produzido pela circulação de um veículo, tendo em conta a pressão do ar a que está submetido.

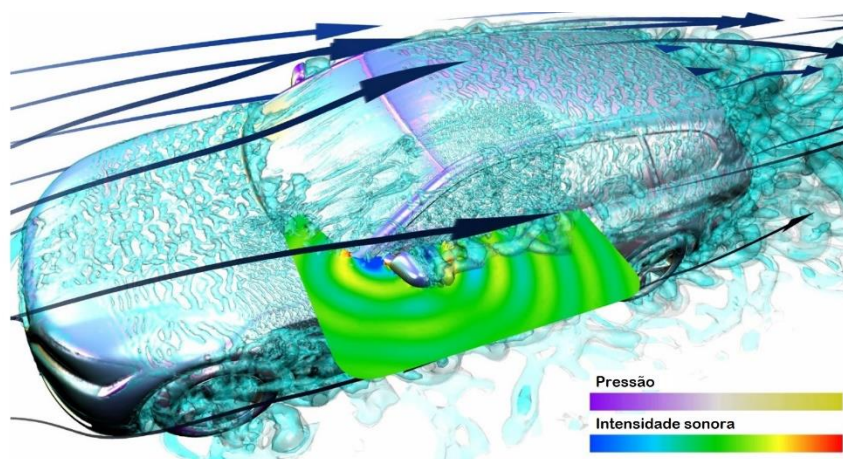


Figura 2.8 – Simulação do ruído aerodinâmico num veículo (adaptado de Enteknograte.Com, 2023)

O ruído produzido pelo funcionamento do próprio veículo pode ser originado por vários elementos constituintes, nomeadamente o motor (a combustão ou elétrico), e por todos

os outros constituintes que têm movimentos vibratórios como a suspensão, os travões, a transmissão, o escape, entre outros.

O ruído do contacto pneu/pavimento é uma fonte com parâmetros mais complexos que os anteriores, pois este tipo de ruído depende de várias características que envolvem o pneu, o próprio veículo e o pavimento. Neste âmbito, podem ser considerados dois tipos de mecanismos emissores de ruído, os mecânicos e os aerodinâmicos (Enteknograte.Com, 2023)

Apesar desta divisão o ruído gerado pela ligação pneu/pavimento pode variar com o modelo do veículo, com a sua idade e peso do eixo, assim como com as características do próprio pneu, nomeadamente o perfil, o rasto, a pressão, a temperatura, o tamanho e o material do pneu. No que se refere à superfície de rolamento também a macrotextura da camada de desgaste do pavimento, estado e temperatura da mesma têm influência no ruído gerado, assim como a velocidade a que circula o veículo.

Os mecanismos de emissão mecânica são vibrações do pneu em si mesmo e vibrações causadas pela aderência do pneu à superfície do pavimento, adere/desliza e adere/descola (Sandberg & Ejsmont, 2002).

Na Figura 2.9 apresenta-se um esquema dos mecanismos de emissão mecânicos, a vibração tangencial, vibração radial, vibração tangencial e vibração lateral.

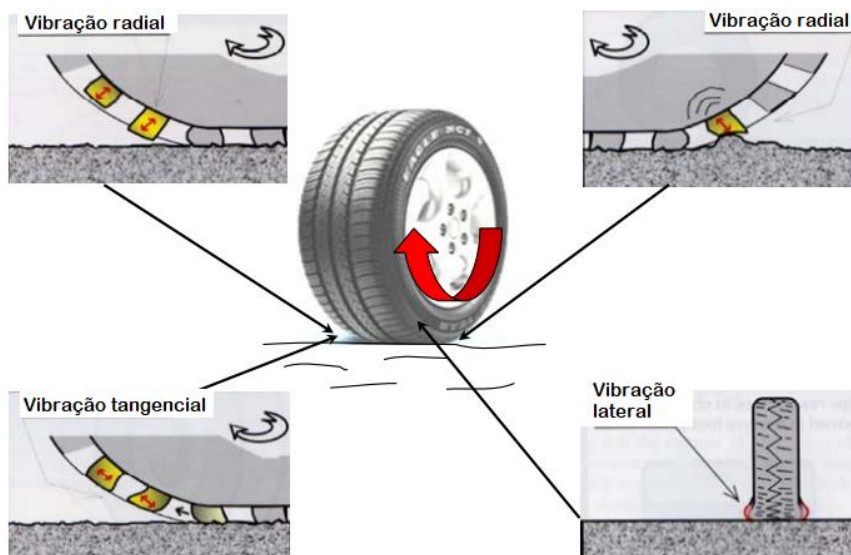


Figura 2.9 – Mecanismos mecânicos de emissão de ruído pneu/pavimento (adaptado de Sandberg & Ejsmont, 2002)

Os mecanismos de emissão aerodinâmica são todos os tipos de vibrações criadas pela passagem de ar entre as ranhuras e sulcos do rasto do pneu que criam bombeamento de ar, ressonâncias de ar ou radiação da ressonância de ar (Sandberg & Ejsmont, 2002).

Na Figura 2.10 apresenta-se um esquema elucidativo dos mecanismos de emissão aerodinâmicos, a ressonância de ar nas cavidades e o bombeamento de ar e também do efeito de amplificação criado pelas cavidades após a produção do ruído.

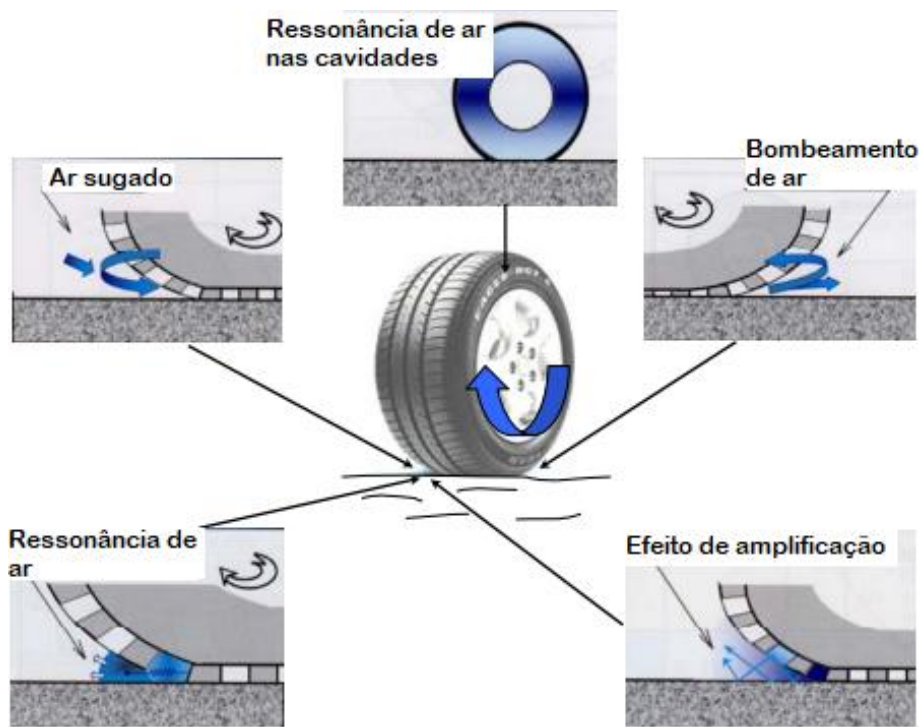


Figura 2.10 - Mecanismos aerodinâmicos de emissão de ruído pneu/pavimento (adaptado de Sandberg & Ejsmont, 2002)

O ruído gerado pelo contacto pneu/pavimento é o que tem maior contribuição para a poluição sonora rodoviária, quando se considera a normal circulação em estrada.

Na Figura 2.11 pode ser observado um gráfico que representa o ruído emitido por um veículo ligeiro e por um veículo pesado, através do motor e, pelo rolamento no pavimento rodoviário (ligação pneu/pavimento).

O aumento da velocidade resulta no aumento da contribuição da ligação pneu/pavimento, a uma velocidade elevada o nível sonoro produzido pela ligação pneu/pavimento é praticamente igual ao nível sonoro total que está a ser gerado.

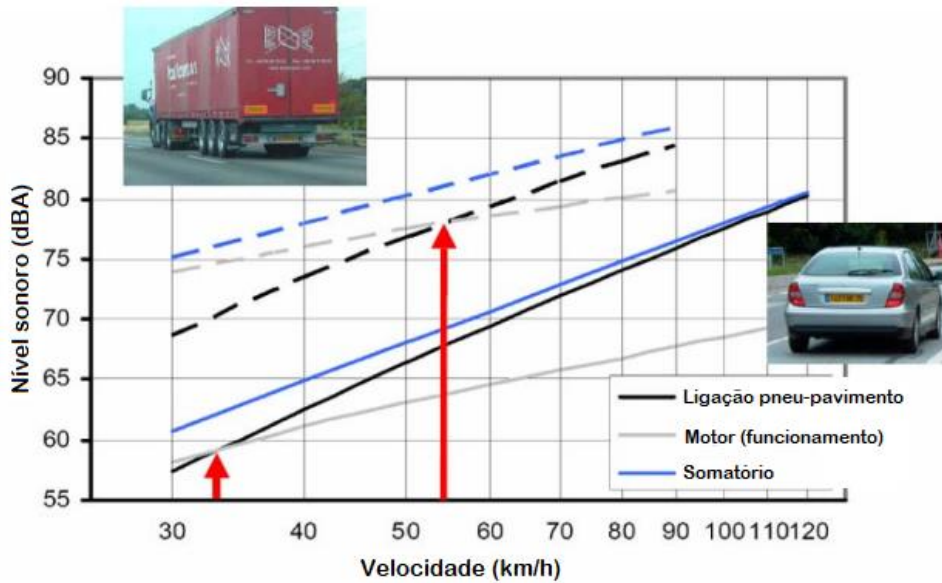


Figura 2.11 – Níveis sonoros produzidos pela circulação de veículos a diferentes velocidades (adaptado de Bendtsen, 2007)

O nível sonoro gerado está relacionado com as características da camada de desgaste, pelo que a sua escolha é decisiva para a redução de ruído e vibrações da infraestrutura.

Para conhecer a propagação de ruído de uma determinada fonte localizada, é necessário conhecer a distância entre esta fonte e o respetivo recetor.

A propagação de uma vibração é descrita pela Lei do Inverso do Quadrado da Distância que diz que o nível sonoro varia de forma inversa ao quadrado de distância, à medida que a distância aumenta, o nível sonoro diminui (da Silva Santos, 2007).

O ruído rodoviário nem sempre pode ser definido por uma fonte localizada, pois o ruído é gerado por várias fontes simultaneamente em diferentes pontos da estrada, pelo que este fenómeno é descrito como fonte em linha.

Neste caso o nível sonoro captado pelo recetor diminui com o aumento da distância à fonte emissora em linha.

Considerando dois cenários idênticos em que a distância à fonte é igual, em que o Caso 1 tem uma fonte emissora localizada e imóvel e o Caso 2 tem uma fonte em linha, o nível sonoro não seria proporcional.

O recetor do Caso 1 irá ouvir um nível sonoro menor relativamente ao recetor do Caso 2, porque a intensidade da fonte em linha decresce em menor valor face à intensidade da fonte localizada.

As expressões (2.8) e (2.9) (da Silva Santos, 2007) representam o nível sonoro de uma fonte localizada e de uma fonte em linha respetivamente.

$$L_A = L_{REF} - 20 \log \frac{r}{r_{REF}} \quad (2.8)$$

Em que:

L_A – nível sonoro a uma distância r (dB);

L_{REF} – nível sonoro de referência (dB);

r – distância entre a fonte e o recetor (m);

r_{REF} – distância de referência (m)

$$L_A = L_{REF} - 10 \log \frac{r}{r_{REF}} \quad (2.9)$$

Em que:

L_A – nível sonoro a uma distância r (dB);

L_{REF} – nível sonoro de referência (dB);

r – distância entre a fonte e o recetor (m);

r_{REF} – distância de referência (m).

Atendendo às expressões é possível verificar a diferença do nível sonoro ouvido nos casos 1 e 2 referidos anteriormente, as expressões são semelhantes à exceção do coeficiente que multiplica o logaritmo, no caso da fonte localizada toma o valor de 10 enquanto para a fonte em linha é 20.

O logaritmo da distância da fonte ao recetor a dividir pela distância de referência representa a diminuição da intensidade sonora devido à distância à fonte, logo se a intensidade diminui a um ritmo superior com o aumento da distância no caso da fonte localizada, o coeficiente deve superior ao da fonte em linha para marcar um decréscimo mais acelerado.

3. Mitigação de Ruído e das Vibrações

3.1 Importância da mitigação de ruído e das vibrações

O ruído e as vibrações podem ter para os seres vivos e para as próprias infraestruturas.

Para o ser humano o ruído pode causar distúrbios nas atividades diárias, problemas de sono, problemas de saúde cardiovasculares, stress, ansiedade e danos auditivos.

Um estudo da Universidade do Minho sobre o Impacto do ruído na saúde e qualidade de vida das pessoas concluiu que os esforços das populações e dos municípios para reduzir os níveis de ruído rodoviário traduzem-se em melhorias substanciais para a qualidade de vida e da saúde das pessoas (Mendes & Silva, 2002).

O nível sonoro gerado pela ligação pneu-pavimento dos veículos é o que tem maior contribuição para a ruído rodoviário e este pode tomar diferentes grandezas consoante a superfície da infraestrutura viária.

Os fatores que determinam o nível de ruído gerado e o conseqüente incómodo são a velocidade de circulação, o tipo de superfície de pavimento e as características do pneu.

Dados de investigação na área apontam para que velocidades mais elevadas em estradas com misturas densas sejam as que criam maior incómodo ao recetor, no que toca a estradas constituídas por pavimentos flexíveis (Freitas, Mendonça, et al., 2012).

O gráfico da Figura 3.1 representa a relação obtida entre o nível sonoro medido (em decibéis) e o nível de incómodo, numa escala de 1 a 10, indicado por um grupo de recetores relativo à circulação de veículos em três tipos de pavimentos: em calçada, em betuminoso denso e em betuminoso modificado com borracha.

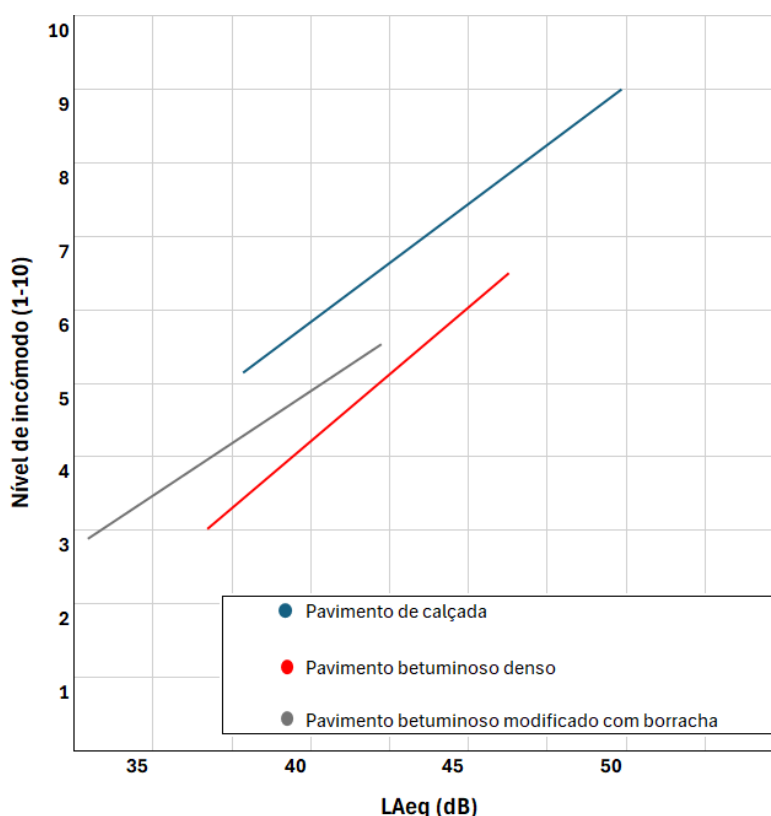


Figura 3.1 – Relação entre o nível sonoro e o nível de incómodo associado à circulação em diferentes tipos de pavimento (adaptado de Freitas, Mendonça, et al., 2012)

Analisando o gráfico da Figura 3.1, o nível de incómodo máximo registado para o pavimento em calçada é de cerca de 50 dB, para os pavimentos betuminosos é de aproximadamente 46 dB para a mistura densa e de 42 dB para a mistura modificada com borracha e os níveis de incómodo declarados são, respetivamente, 9, 6.5 e 5.5.

A diferença entre o nível sonoro máximo medido para cada pavimento não tem uma relação direta com o nível de incómodo proferido pelos participantes.

As misturas betuminosas tiveram ambos níveis de incómodo relativamente próximos, com uma diferença de 1.0 pontos, tendo uma diferença de nível sonoro de 4 dB entre as mesmas, a calçada obteve um valor de incómodo de 9, mais 2.5 pontos que a mistura densa e, no entanto, esta teve uma diferença de nível sonoro de 4 dB face à mistura densa, valor igual ao da diferença entre as duas misturas betuminosas.

De acordo com os resultados dos ensaios realizados sobre os pavimentos em calçada, betuminoso denso e betuminoso modificado com borracha, verifica-se que com o aumento da velocidade, o pavimento em calçada apresentou um maior nível de incómodo face aos restantes pavimentos, tal como se pode observar na Figura 3. 2.

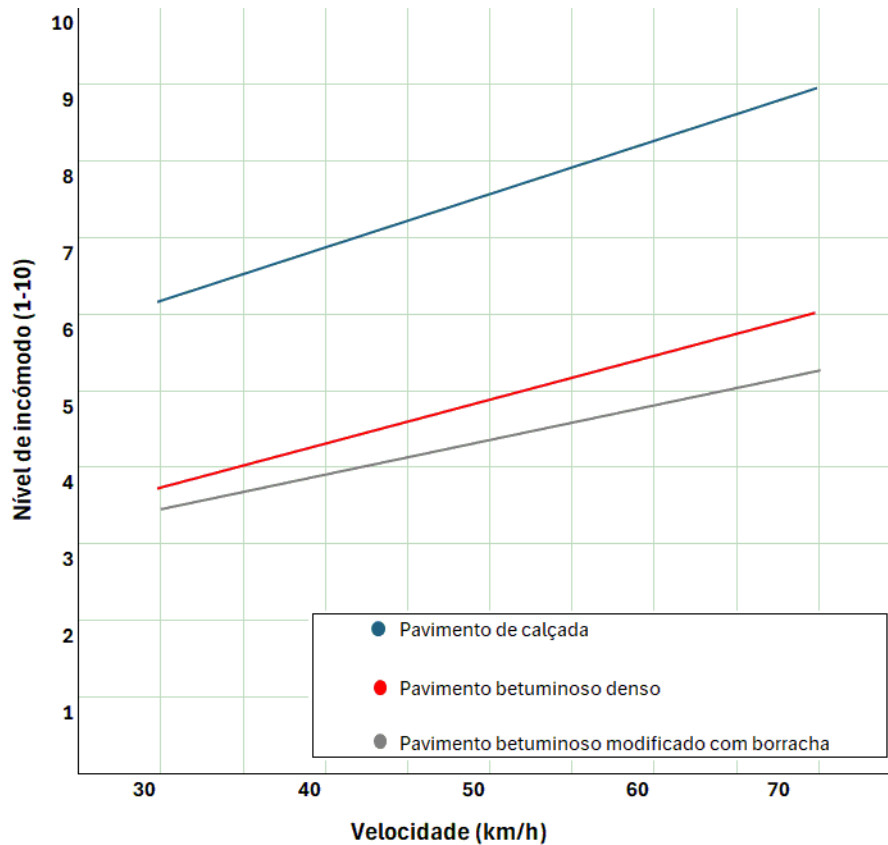


Figura 3. 2 – Relação entre a velocidade de tráfego e o nível de incômodo associado para diferentes tipos de pavimento (adaptado de Freitas, Mendonça, et al., 2012)

A diferença de nível de incômodo entre o pavimento em calçada face aos pavimentos betuminosos demonstra as suas inconveniências.

Na generalidade o pavimento em calçada existe por motivos de preservação de um local histórico onde são praticadas velocidades baixas que mantêm a produção de ruído ao mínimo. Por norma, nestes locais há também incentivos para dissuadir o tráfego automóvel, tais como diminuição de lugares de estacionamento, aumento dos preços de estacionamento, proibição de trânsito para certos tipos de veículos e limitação de estacionamento apenas para moradores.

O valor de nível sonoro não é o único fator a definir o nível de incômodo dos ouvintes, há outro fator significativo, a frequência.

Não estão determinadas as frequências que causam o maior nível de incômodo (Freitas, Mendonça, et al., 2012), cada tipo de pavimento produz um som diferente e a frequência que pode gerar maior sentimento de desconforto não tem o mesmo valor para diferentes superfícies.

A fauna também sofre consequências com o ruído apesar de nem todos serem do mesmo espectro do que os que afetam os humanos. Há animais com capacidades auditivas bastante mais desenvolvidas que o ser humano e como consequência podem ter um aumento nos danos sofridos.

Para animais e seres humanos é importante haver um bom controlo do ruído e vibrações produzidas para assegurar a saúde de todos.

As vibrações de ruído estrutural podem ser problemáticas para infraestruturas pois induzem instabilidade e fadiga nos elementos constituintes, colocando em risco a integridade estrutural e comprometendo a sua estabilidade.

A mitigação de ruído e vibrações é um ponto importante a ter em consideração em projeto devido aos problemas que estes fenómenos podem causar à saúde e à própria segurança da infraestrutura. A Agência Portuguesa do Ambiente (APA) tem definidos os valores de referência de nível de pressão sonora para cada tipo de sensação causada ao ser humano por um som, estes limites estão apresentados na Figura 3.3.



Figura 3.3 - Limites de nível de pressão sonora para diferentes tipos de ruído (adaptado de Agência Portuguesa do Ambiente, 2023)

De acordo com os valores da Figura 3.3 é possível constatar que um som com nível de pressão sonora acima de 50 dB pode ser caracterizado como ruído, pelo facto de já causar uma sensação incomodativa ao ouvido humano.

O facto do limite inferior do nível sonoro indicador de uma sensação incomodativa, segundo a Agência Portuguesa do Ambiente, ser de 50 dB pode explicar a razão de o pavimento ensaiado em calçada ter causado um nível de perturbação tão diferente dos

pavimentos betuminosos. A diferença entre os níveis sonoros e os níveis de incómodo não é proporcional, porém o pavimento em calçada atinge um nível sonoro com um valor que já se caracteriza como incomodativo, algo que não se aplica aos outros pavimentos ensaiados.

3.2 Legislação aplicável

Em Portugal a legislação que estabelece os limites de produção de ruído é o Regulamento Geral do Ruído, que está presente em Diário da República no Decreto-Lei n.º 9/2007 (2007) .

Este decreto é aplicável ao ruído produzido por fontes em locais de laboração de indústria, de comércio e de serviços, infraestruturas e tráfego rodoviárias, ferroviárias e aéreas, obras de construção civil, espetáculos, diversões, manifestações desportivas, feiras, mercados, equipamentos para utilização no exterior, sinais sonoros (exceto dispositivos de segurança de passagens de nível) e de ruído de vizinhança.

Estabelece que cada tipo de fonte emissora de ruído deve estar sujeito a certas condições e medidas de controlo sonoro no respetivo licenciamento ou autorização. Após o início da atividade a fonte emissora fica também sujeita a fiscalização do cumprimento dos limites a esta aplicados (Agência Portuguesa do Ambiente, 2023).

De acordo com o referido decreto os limites de ruído estão associados ao tipo de zona em que são produzidos, estabelecendo dois tipos de zonas distintas definidas pelo Plano Municipal de Ordenamento de Território: sensíveis e mistas (Decreto-Lei n.º 9/2007 (2007)).

As zonas sensíveis são áreas para utilização habitacional, escolas, hospitais ou outras instituições ligadas à saúde e espaços de lazer.

As zonas mistas são áreas para a coexistência de infraestruturas definidas para zonas sensíveis e de infraestruturas para outro tipo de utilização.

Na Tabela 3.1 são apresentados os valores limite de ruído, pelo indicador L_{den} (nível de ruído diurno-entardecer-noturno).

Nesta tabela são referidos outros dois tipos de zonas sensíveis a que podem ser aplicados valores diferentes, referentes à proximidade de uma grande infraestrutura de transporte existente ou em projeto, sendo o valor limite superior devido à importância que estas infraestruturas têm e de não ser possível baixar o nível de ruído produzido. No caso das zonas sensíveis com proximidade a grandes infraestruturas de transporte

existentes, o limite de ruído aumenta para o valor de 65 dB, uma diferença de 10 dB face ao valor atribuído a uma zona sensível.

Um exemplo de uma situação onde é permitido um limite superior é para uma infraestrutura de transporte aéreo existente, não é possível reduzir o ruído dos motores de aviões para o nível pretendido para uma zona sensível porque ainda não existe tecnologia para tal.

Tabela 3.1 – Valores limites definidos para ruído para cada tipo de zona (Decreto-Lei n.o 9/2007, 2007)

Tipo de zona	Lden (dB)
Zona sensível	55
Zona sensível com proximidade a grande infraestrutura de transporte existente	65
Zona sensível com proximidade a grande infraestrutura de transporte em projeto	60
Zona mista	65

A produção de ruído está também limitada em termos horários, a sua divisão é feita em três períodos de referência, o período diário, das 7h às 20h, o período do entardecer, das 20h às 23h e o período noturno, das 23h às 7h.

Em Diário da República o Decreto-Lei n.º84-A/2022 (2022) prevê as disposições e a obrigatoriedade com que deve ser efetuado o controlo de ruído para as infraestruturas rodoviárias, ferroviárias e aéreas, este é denominado de Regime de Avaliação e Gestão do Ruído Ambiente.

Após a fiscalização há a obrigatoriedade de elaborar um mapa estratégico de ruído para a zona exposta à fonte emissora em questão, as entidades responsáveis devem proceder a traçar um plano para mitigar os problemas identificados no mapa estratégico.

Esta obrigatoriedade é válida para infraestruturas de transportes tais como grandes eixos rodoviários com fluxo de tráfego superior a 3000000 veículos por ano, grandes eixos ferroviários com fluxo de tráfego superior a 30000 comboios por ano, grandes aeroportos com fluxo de tráfego superior a 50000 movimentos por ano, e também para grandes aglomerados urbanos, com uma população superior a 100000 habitantes (Decreto-Lei n.º84-A/2022, 2022).

O mapa de ruído é uma representação que divide uma zona em diferentes áreas consoante a sua respetiva classe de ruído exterior local. As classes de ruído estão tabeladas pela Agência Portuguesa do Ambiente, tal como as diretrizes para o cálculo destes mapas (Guedes et al., 2008).

Para além da legislação que regula as fontes emissoras de ruído há também a mencionar a Declaração de Impacte Ambiental (DIA), pela sua relevância. Este documento é fundamental, pois sem a sua aprovação os projetos não podem proceder para fase de execução, devem ser revistos até estarem dentro dos limites regulamentares.

Esta declaração identifica as características de um projeto que afetam de forma negativa o ambiente, sendo que um dos fatores é o ruído emitido, pois este pode causar consequências para a envolvente.

Estes fatores são deduzidos através de uma Avaliação de Impacte Ambiental (AIA), procedimento de avaliação que deve decorrer durante a fase de estudo prévio, anteprojeto ou projeto de execução (Agência Portuguesa do Ambiente, 2023).

As normas técnicas da Declaração de Impacte Ambiental estão definidas na Portaria n.º 395/2015 (2015), tais como os conteúdos mínimos dos Estudos de Impacte Ambiental, as normas para a elaboração dos relatórios e os detalhes dos critérios de análise.

A Avaliação de Impacte Ambiental consiste numa análise dos possíveis impactes ambientais consequentes da execução de um projeto, sendo o seu objetivo recolher informação para suportar a tomada de decisão sobre a viabilidade ambiental da concretização do projeto em questão.

Esta avaliação é uma ferramenta que não só estuda os possíveis impactes, também deve definir medidas para mitigar ou minimizar os impactes e introduzir uma metodologia de monitorização posterior à execução do projeto, para analisar os impactes resultantes do seu desenvolvimento (Agência Portuguesa do Ambiente, 2023)

Uma AIA, em termos jurídicos, decorre em duas fases, uma primeira fase de definição de âmbito e uma segunda fase de avaliação de impacte ambiental.

Na definição de âmbito, tal como indica o nome, são identificadas as características ambientais que podem sofrer consequências com o projeto e sobre as quais o Estudo de Impacte Ambiental (EIA) de analisar. Na segunda fase, a fase de AIA, é feita a ponderação da viabilidade de acordo com os dados obtidos no Estudo de Impacte Ambiental (Agência Portuguesa do Ambiente, 2023).

A Avaliação de Impacte Ambiental está regulada pelo Decreto-Lei n.º151-B/2013 (2013), neste documento está estabelecido o regime jurídico, tendo como base a regulamentação europeia.

Este documento contém a definição do procedimento, as etapas, os tipos de projetos que estão sujeitos a realização destas avaliações e relação com as autoridades e com o público (Agência Portuguesa do Ambiente, 2023).

A DIA, dependendo da AIA, pode tomar os resultados de DIA favorável, favorável condicionada ou desfavorável. Uma DIA favorável condicionada permite o avanço para projeto de execução porém tem previstas medidas adicionais às medidas ambientais inicialmente implementadas, estas que devem ser cumpridas para evitar a suspensão ou até inviabilização do projeto (Agência Portuguesa do Ambiente, 2023).

Após a obtenção da Declaração de Impacte Ambiental favorável ou favorável condicionada é necessário obter uma Decisão sobre a Conformidade Ambiental do Projeto de Execução (DCAPE) para iniciar o projeto de execução. O DCAPE é a declaração que verifica o cumprimento das condições impostas pela DIA no projeto de execução e se as medidas de mitigação previstas estão devidamente incluídas no projeto.

A autoridade que tem a função da AIA é a APA para a generalidade dos projetos e a Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional para alguns casos.

A produção de ruído é também um dos fatores presentes no Regime da Avaliação de Impacte Ambiental, norma que define as características a avaliar de um local e os fatores ambientais que podem ser afetados por um projeto de uma nova infraestrutura, informação que deverá fazer parte do Estudo de Impacte Ambiental.

Este regime faz parte da Lei de Bases do Ambiente, presente no Diário da República como Lei n.º 19/2014 (2014), esta lei abrange a gestão dos recursos hídricos, a poluição atmosférica, a proteção da biodiversidade e dos ecossistemas, os resíduos e a respetiva gestão, o ruído ambiental e as alterações climáticas.

4. Medidas de Mitigação de Ruído e das Vibrações

As infraestruturas rodoviárias representam um dos tipos de vias de comunicação predominantes em todo o mundo e já fazem parte da intervenção humana no território.

Estas, tal como as conhecemos, existem desde meados do século XX e desde essa época que têm surgido problemas relacionados com o ruído e com as vibrações e que, originaram diversas formas de mitigação e de resolução dos mesmos (Knauer et al., 2000).

Os principais sistemas e medidas de atenuação de ruído e vibrações provenientes da circulação viária são a diminuição da velocidade de circulação, a utilização de camadas de desgaste de baixo ruído e a implantação de barreiras acústicas.

Esta sequência relaciona-se com a forma como prioritariamente devem ser introduzidas as medidas de minimização de ruído, pois a primeira medida corresponde à diminuição do ruído na fonte (diminuir o som produzido pelos motores e pelo atrito pneu/pavimento) e só depois introduzir medidas que impeçam a propagação do ruído remanescente.

4.1 Diminuição da velocidade de circulação

A diminuição de velocidade de circulação pode ser considerada uma medida de redução de ruído pois a velocidade é proporcional ao nível de pressão sonora originado pelos ruídos aerodinâmico e pelos ruídos gerado no contacto pneu/pavimento.

A aceleração e a travagem dos veículos que circulam a velocidades elevadas produzem um nível de ruído bastante mais elevado do que o nível de ruído produzido na circulação a baixas velocidades.

Em ambiente urbano existem várias medidas disponíveis para reduzir a velocidade de circulação, tais como a aplicação de bandas cromáticas e de lombas, a colocação de outros tipos de sinalização de controle de velocidade e a alteração do traçado da via (Yanagiya & Abiko, 2021).

Em ambiente rural as velocidades de circulação mais elevadas que podem causar distúrbios são praticadas em autoestradas, onde pode ser aplicada sinalização de redução de velocidade, e em estradas nacionais localizadas na proximidade de

aglomerados populacionais, que neste caso podem ser aplicadas as mesmas medidas mencionadas para ambiente urbano.

Estas medidas são aplicadas na maioria das situações por motivos de segurança rodoviária, no entanto a redução do ruído devido à diminuição da velocidade é uma consequência favorável.

A utilização de lombas nem sempre tem um efeito positivo a nível do ruído, pois o ciclo de passagens de veículos pode torná-las em elementos prejudiciais a nível acústico na envolvente.

Também a implementação de interseções giratórias constitui uma medida que promove uma redução da velocidade de circulação, pois elementos dissuasores de velocidades excessivas.

Estas medidas são geralmente aplicadas nos meios urbanos, cuja envolvente é composta na sua maioria por edificado residencial e comercial.

4.2 Pavimentos e misturas betuminosas

Ao nível dos pavimentos rodoviários as medidas de minimização de ruído diferem consoante a sua tipologia, ou seja, no caso dos pavimentos flexíveis, é a camada de desgaste que constitui o parâmetro manipulável para a atenuação do ruído.

Já no caso dos pavimentos rígidos a variação do ruído não pode ser alterada pela composição da laje de betão de cimento da camada de desgaste, mas sim pela ranhuração (da Silva Santos, 2007).

➤ Pavimentos flexíveis

As características que determinam o comportamento acústico de um pavimento com uma camada de desgaste betuminosa são a macrotextura, a megatextura, a porosidade e a elasticidade da mistura, sendo contudo as características determinantes as referentes à textura (Freitas, 2013).

A textura do pavimento é descrita como a diferença entre a superfície de um pavimento e uma superfície de referência plana, a classificação da textura é feita de acordo com o comprimento de onda, os limites para cada classe estão definidos na EN ISO 13473-1 (Azevedo, n.d.).

Na Figura 4.1 apresenta-se a classificação da textura consoante o comprimento de onda.

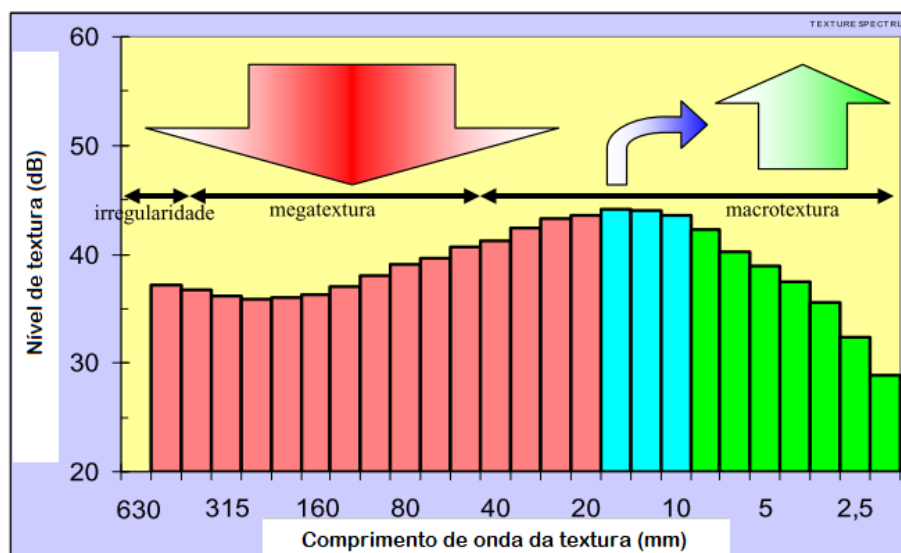


Figura 4.1 – Comprimento de onda correspondente ao nível de textura (adaptado de Freitas, 2013)

O comprimento de onda da macrotextura está definido entre os 0.5 e 50 mm e o comprimento de onda da megatextura entre os 50 e os 500 mm (Freitas, 2013).

Um aumento de amplitude na faixa de comprimentos de onda de 0.5 a 10 mm pode diminuir o ruído emitido nas frequências com valor superior a 1000 Hz. No caso de aumento na faixa de 10 a 500 mm irá haver um aumento do ruído emitido nas frequências com valor inferior a 1000 Hz (Freitas, 2013).

A superfície de um pavimento deve ter uma megatextura homogênea, sem irregularidades, para evitar situações em que seja criada vibração de pneus.

Quanto à macrotextura a superfície não deve ser completamente lisa, deve ser aberta e negativa de modo a reduzir o bombeamento de ar. Para tal a dimensão de agregados angulares deve ser inferior a 8 mm, sendo que a dimensão recomendável está entre os 3 e 5 mm (Freitas, 2013).

A porosidade é uma das características importantes para o bom desempenho acústico, um valor de vazios adequado e que estes estejam interligados.

O facto dos vazios serem comunicantes reduz o efeito de bombeamento de ar e deste modo diminui a propagação do som gerado (Freitas, 2013).

Uma superfície viscoelástica produz o efeito de amortecimento das vibrações induzidas pelos pneus e reduz o ruído emitido (Freitas, 2013).

Para os pavimentos flexíveis as misturas que apresentam melhores resultados na redução de ruído são as misturas porosas, misturas com espessura fina, modificadas com borracha, modificadas com cortiça e modificadas com argila expandida.

As estradas com velocidades de tráfego mais elevadas são as que requerem uma determinação de superfície de pavimento mais ponderada pois serão as que irão gerar mais ruído, as estradas em meio urbano não estão sujeitas a uma análise tão aprofundada devido às baixas velocidades de circulação.

Em meio urbano um pavimento com uma camada de desgaste de betão betuminoso convencional poderá ser o necessário para obter níveis de ruído adequados (Knauer et al., 2000).

As misturas porosas são caracterizadas por terem um alto volume de vazios, e por apresentarem bons resultados na minimização do ruído, nomeadamente as misturas rugosas e as drenantes.

- **Misturas betuminosas rugosas**

As misturas rugosas são compostas por betume modificado e uma grande percentagem de agregado de dimensão superior a 2 mm (83-87%) que possibilitam a existência de vazios. O volume de vazios por norma está entre os 20% e 24% e é o que possibilita a macrotextura característica deste tipo de misturas, que produz o efeito de redução do ruído (Abbott et al., 2006).

Esta mistura também tem vantagens como uma melhor drenagem da superfície e boa aderência em condições secas ou molhadas. A drenagem da superfície é uma característica importante pois a existência de água na superfície altera o nível de ruído gerado.

Na Figura 4.2 apresenta-se um provete relativo a uma mistura porosa e na Figura 4.3 a relação das dimensões do agregado constituinte. No provete são visíveis os vazios criados pela granulometria assim como o facto de serem comunicantes.



Figura 4.2 – Provete de mistura porosa (PavementInteractive.Org, 2023)

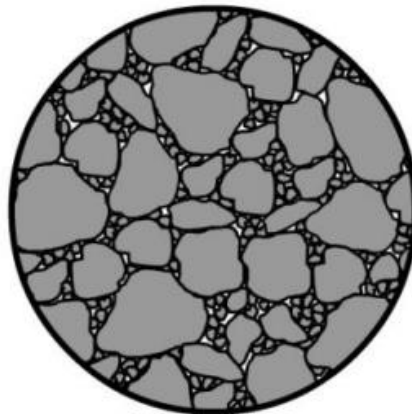


Figura 4.3 – Agregados relativos a mistura betuminosa rugosa (adaptado de Miranda, 2023)

- **Mistura betuminosa drenante**

A mistura drenante é uma mistura é caracterizada por ter granulometria descontínua e um volume de vazios entre os 15 % e 20 % o que permite obter um efeito de absorção sonora.

O volume de vazios característico induz uma melhor drenagem da água da superfície e favorece a redução do efeito de compressão de ar, ruído da ligação pneu/pavimento do tipo aerodinâmico. A porosidade desta mistura também favorece a absorção dos restantes ruídos do veículo (Knauer et al., 2000).

Com o objetivo de verificar a existência de alguma relação entre a dimensão máxima do agregado neste tipo de misturas e o seu desempenho acústico, foram ensaiadas várias misturas compostas por agregado com dimensão máxima de 8, 10, 13 e 19 mm.

O agregado de 8 mm demonstrou-se como a dimensão máxima recomendável em termos acústicos, porém ainda é necessária uma pesquisa mais aprofundada futuramente, de acordo com estudos realizados na Coreia do Sul (Lee et al., 2023).

Pavimentos com este tipo de misturas na camada de desgaste requerem uma manutenção regular pois as tensões induzidas pelo tráfego vão deteriorando referida camada. Os detritos resultantes causam uma diminuição do efeito de redução de ruído e podem causar irregularidades na superfície, o que afeta a segurança e o conforto na circulação dos veículos.

- **Camadas de desgaste de espessura fina**

A colocação de camadas de desgaste com espessura fina é, segundo Abbott et al. (2006), uma solução eficiente para a atenuação do ruído rodoviário.

Camadas com espessuras compreendidas entre os 3 e 4 cm, constituídas por agregados com uma alta percentagem de vazios preenchidos com betume, argamassa ou mástique, são utilizadas devido ao seu baixo custo, durabilidade, resistência e redução de ruído, porém devem apenas ser utilizadas em locais com pouco tráfego para evitar a criação de anomalias.

A granulometria contínua deste tipo de mistura indica que o pavimento irá ter uma boa resistência à deformação e à fadiga.

Uma vantagem deste tipo de solução é que 70 % do material constituinte da camada pode ser reciclado e reutilizado numa beneficiação futura (Knauer et al., 2000).

No entanto, este tipo de solução apresenta a desvantagem de ser mais sensível relativamente à reflexão de fendas quando comparada com outras soluções com uma espessura maior. Com o objetivo de minimizar este aspeto, têm sido desenvolvidos estudos que apontam como resolução a utilização de uma mistura modificada com borracha e adição de uma membrana de absorção de tensões, também designada por SAMI (Stress Absorbing Membrane Interlayer) (Kragh et al., 2011).

Este tipo de pavimento de baixo ruído tem um período de vida útil entre os 12 e os 20 anos, um valor comum para uma camada de desgaste, mas com a vantagem de poder ser reciclada e recolocada para permanecer como solução de mitigação de ruído. (Knauer et al., 2000).

Na Figura 4.4 é possível observar um carote de um pavimento com uma camada de desgaste com espessura fina.



Figura 4.4 – Carote de pavimento com camada de desgaste de espessura fina (FHWA, 2018)

As camadas de espessura fina têm características acústicas semelhantes às misturas porosas e características de durabilidade semelhantes às misturas SMA (Stone Mastic Asphalt), juntando assim as vantagens dos dois tipos de misturas, pelo que esta se revela uma solução notável (Antunes & Patrício, 2008).

O micro-betão betuminoso é uma mistura ideal para este tipo de solução devido à sua regularidade e boa aderência oferecidas apesar da espessura reduzida, que é conferida pela utilização de agregados de menor dimensão que não ultrapassam os 6 mm (CEPSA, 2007).

Este tipo de mistura pode ser densa ou porosa, a diferença está na macrotextura, que é definida pela profundidade média de areia medida no ensaio de mancha de areia (Ranazzi, 2016), sendo que a mistura densa tem uma macrotextura fechada e a porosa uma macrotextura aberta .

Na Tabela 4.1 apresentam-se os valores da profundidade de areia que definem cada tipo de macrotextura.

Tabela 4.1 – Classificação da macrotextura no ensaio de mancha de areia (adaptado de Pasquet, 1968)

HS (mm)	Macrotextura
≤ 0.20	Muito fechada
$0.20 < HS \leq 0.40$	Fechada
$0.40 \leq HS \leq 0.80$	Média
$0.80 < HS \leq 1.20$	Aberta
$HS > 1.20$	Muito aberta

Em que:

HS – Profundidade média de areia no ensaio de mancha de areia (mm).

De acordo com a tabela anterior é possível concluir que uma mistura aberta tem um volume de vazios maior do que uma mistura fechada, o que indica que terá um melhor desempenho acústico.

- **Mistura betuminosa modificada com borracha**

A utilização de borracha em misturas betuminosas pode ser feita através da substituição de uma percentagem de agregado por grânulos de borracha de pequena dimensão ou pela utilização de um betume modificado com borracha.

Os pavimentos testados com misturas com a adição de borracha demonstram um bom desempenho acústico, porém têm uma durabilidade reduzida face a misturas betuminosas convencionais. No caso dos pavimentos com misturas com betume modificado com borracha os resultados quanto ao desempenho acústico e durabilidade são ambos positivos, revelando que esta é a opção mais vantajosa (P. Pereira et al., 2006). Deste modo, a mistura com borracha que foi escolhida para comparação neste estudo é a que utiliza betume modificado com borracha, todos os estudos referenciados para tal utilizam esta opção.

Segundo o estudo relativo à Avaliação da Eficácia das Medidas de Minimização de Impactes Ambientais Implementadas em Portugal efetuado pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), as misturas de betão modificado com borracha utilizadas em camadas de desgaste podem apresentar desempenhos comparáveis aos das misturas drenantes. Até à data da publicação do estudo foi verificado que a degradação do desempenho acústico ao longo do tempo era inferior à observada nas misturas drenantes, este é um facto interessante dado que a deterioração do desempenho das

misturas drenantes é a sua grande desvantagem e que obriga a uma manutenção mais recorrente (Antunes & Patrício, 2008).

Neste âmbito têm sido realizados vários estudos que comprovam a eficácia dos pavimentos dos quais se destacam um estudo realizado nos Estados Unidos em 1999 e um estudo realizado em Portugal em 2010.

Estudos anteriores indicavam que misturas betuminosas modificadas com borracha tinham uma capacidade de redução de ruído entre 3 a 10 dB (Bollard, 1999), intervalo de valores pouco preciso dada a amplitude de 7 dB .

Uma destas investigações, realizada na cidade de Sacramento, no Estado da Califórnia, nos Estados Unidos, avaliou três pavimentos, dois modificados com borracha e um betuminoso convencional, tendo concluído que o pavimento com adição de borracha obtinha uma redução de 4 dB alguns meses após a colocação.

Após 5 a 6 anos de aplicação dos pavimentos, voltaram a ser testados os pavimentos, verificaram que os pavimentos modificados com borracha ainda mantinham efeito de redução sonora de 3 dB, enquanto o pavimento convencional já não tinha qualquer efeito de redução de ruído.

Considerou-se que a perda de 1 dB no desempenho acústico deveu-se à compactação do pavimento devido às cargas induzidas pelo tráfego (Bollard, 1999).

Em 2010 foi realizado um estudo semelhante em Portugal, com o título *Contribution of Asphalt Rubber Mixtures to Noise Abatement – Time Effect*, com o objetivo de analisar dois pavimentos com misturas betuminosas modificadas com borracha de granulometria contínua e um outro pavimento com uma mistura betuminosa de granulometria descontínua. As características destas misturas são apresentadas na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Características das misturas betuminosas testadas (adaptado de Freitas, 2010)

	Mistura betuminosa modificada com borracha		
	Granulometria contínua 1	Granulometria contínua 2	Granulometria descontínua
MAS (mm)	10	12	12
n (%)	14	13	3.6
BP (%)	9	9	5.1
RP (%)	20	20	0
Idade	< 1 ano	< 1 ano	1 ano

Em que:

MAS – Dimensão máxima de agregado;

n - Porosidade;

BP – Percentagem de betume por peso total;

RP – Percentagem de borracha por peso total de betume.

Este estudo foi efetuado em dois períodos temporais distintos, o primeiro em 2007 e o segundo em 2010, para se conhecer a evolução do desempenho dos diferentes tipos de pavimento (Freitas, 2010).

Os resultados obtidos para os níveis sonoros, medidos nos anos de 2007 e 2010, em função das velocidades de 50, 70 e 90 km/h e para as diferentes granulometrias estão representados nos gráficos das Figura 4.5, Figura 4.6 e Figura 4.7.

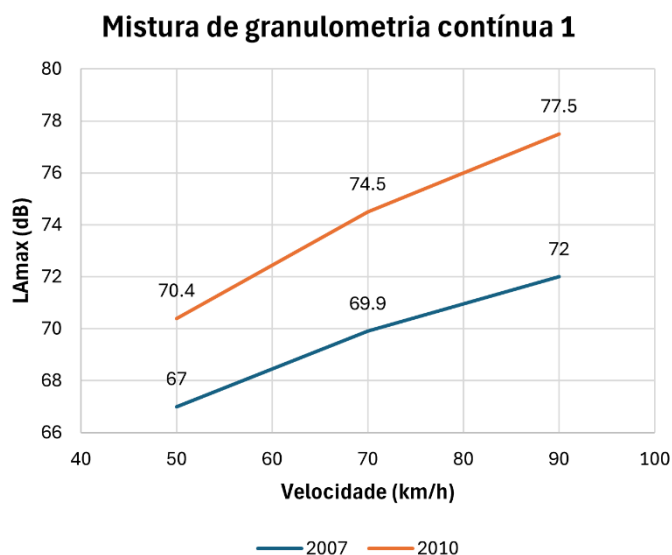


Figura 4.5 - Níveis sonoros em função da velocidade – Mistura contínua 1 (adaptado de Freitas, 2010)

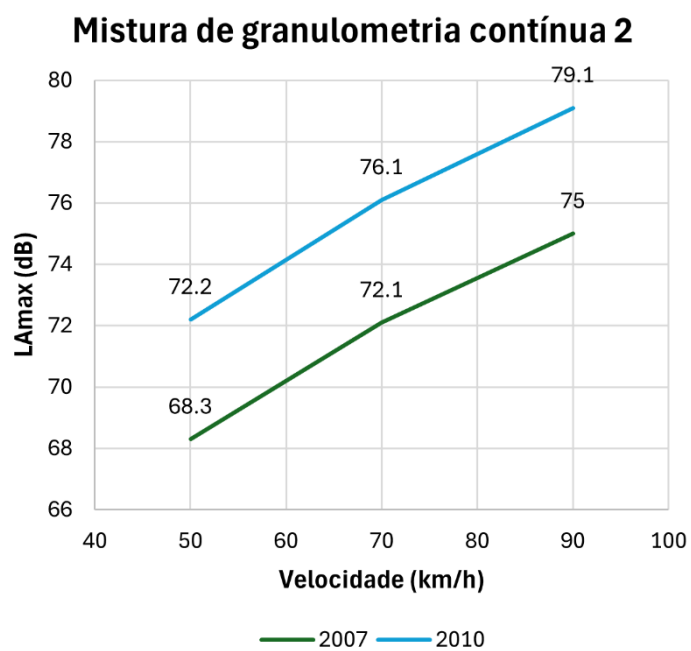


Figura 4.6 - Níveis sonoros em função da velocidade – Mistura contínua 2 (adaptado de Freitas, 2010)

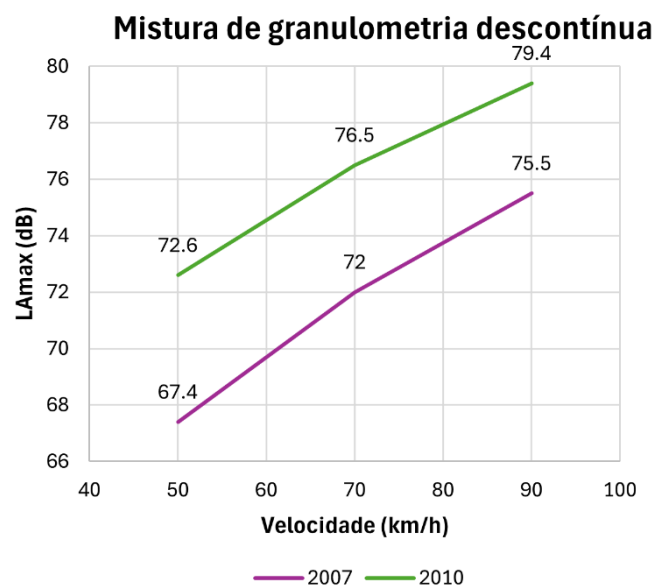


Figura 4.7 - Níveis sonoros em função da velocidade – Mistura descontínua (adaptado de Freitas, 2010)

Na Tabela 4.3 estão apresentadas as variações do nível de ruído calculadas entre os dois ensaios.

Tabela 4.3 – Variação do nível sonoro para diferentes pavimentos em função da velocidade (adaptado de Freitas, 2010)

Velocidade (km/h)	Granulometria contínua 1			Granulometria contínua 2			Granulometria descontínua		
	50	70	90	50	70	90	50	70	90
Variação do nível de ruído (dB)	+3.4	+4.6	+5.5	+3.9	+4	+4.4	+5.1	+4.4	+3.9
Média	+4.5			+4			+4.5		

As conclusões foram as seguintes:

- A adição de borracha a uma mistura betuminosa para uma camada de desgaste diminui o ruído gerado pelo tráfego;
- A mistura modificada com borracha com agregado de dimensão máxima de 12 mm teve o mesmo desempenho acústico para as três velocidades testadas, ao contrário das outras duas misturas. A mistura modificada com borracha com dimensão de agregado máxima de 10 mm tem um melhor desempenho acústico face velocidades mais altas e a mistura betuminosa sem borracha tem um melhor desempenho face a velocidades mais baixas;
- A mistura modificada com borracha com agregado de dimensão máxima de 10 mm é a que tem melhor comportamento acústico (Freitas, 2010).

Este estudo evidenciou uma característica importante das misturas betuminosas, o impacto causado pela dimensão máxima de agregado, sendo o mesmo em função da velocidade de circulação.

- **Mistura betuminosa modificada com cortiça e com argila expandida**

Após o sucesso alcançado com o desempenho acústico da mistura betuminosa modificada com borracha foram sendo testadas novas misturas com diferentes tipos de materiais, dois desses materiais que surgem com resultados promissores são a cortiça e argila expandida.

O estudo que avaliou estas duas misturas foi realizado em Portugal, denominado de *Innovative Low Noise Road Pavement Materials Studied in Portugal*, tendo sido decidido que as camadas testadas seriam camadas de espessura fina em que uma parte do agregado de origem granítica seria substituído por pellets de cortiça ou por pellets de argila expandida.

A utilização de cortiça apresenta-se como uma alternativa sustentável aos materiais mais usuais na produção de misturas betuminosas, esta pode ser proveniente de resíduos da produção de rolhas de cortiça.

Estas duas misturas testadas são compostas por betume modificado com SBS (Estireno-Butadieno-Estireno) para melhorar a aderência das pellets à mistura.

A dimensão das pellets de cortiça deve ser de 1 a 4 mm e as de argila expandida uma dimensão de 2 a 4 mm (Freitas, Oliveira, et al., 2012).

A mistura que utiliza cortiça tem uma percentagem de pellets de 5% por volume total e a mistura de argila expandida tem uma percentagem de pellets de 10% por volume total. Ambas as misturas têm uma granulometria descontínua, tal como se pode observar na Figura 4.8.

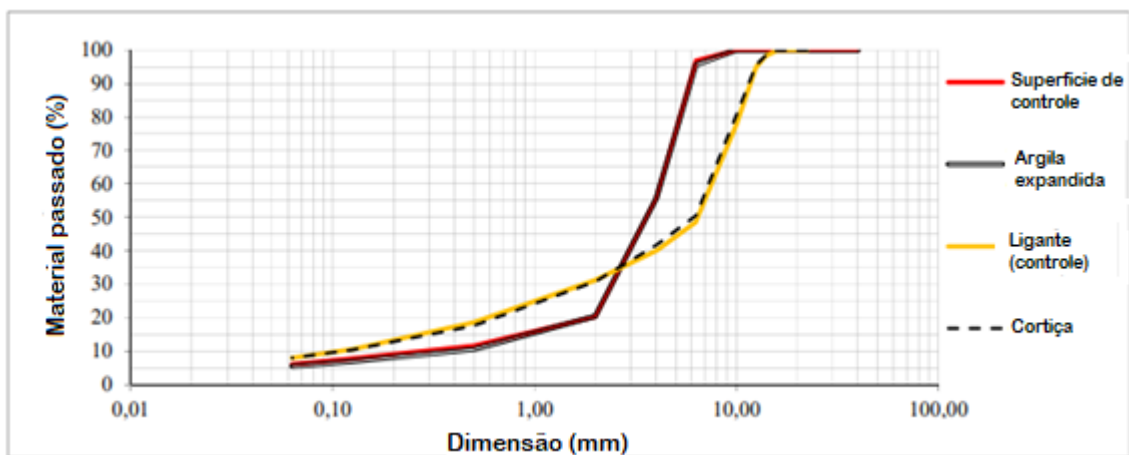


Figura 4.8 – Granulometria das misturas com argila expandida, com cortiça e a mistura betuminosa de controlo ensaiadas (adaptado de Freitas, Oliveira, et al., 2012)

É importante notar que a mistura modificada com cortiça tem uma percentagem de 4.17% de vazios e a mistura modificada com argila expandida uma percentagem de 17.81% (Freitas, Oliveira, et al., 2012).

Este estudo concluiu que as duas misturas não comprometem a segurança na circulação em todo o ciclo de vida do pavimento e que as suas percentagens respetivas por volume total podem ser aumentadas (Freitas, Oliveira, et al., 2012), apesar de que podem ter problemas de polimento dado que as pellets não têm a mesma resistência mecânica que o agregado granítico ou calcário.

Nas Figura 4.9 e Figura 4.10 apresentam-se os resultados dos ensaios de absorção de ruído em função da frequência.

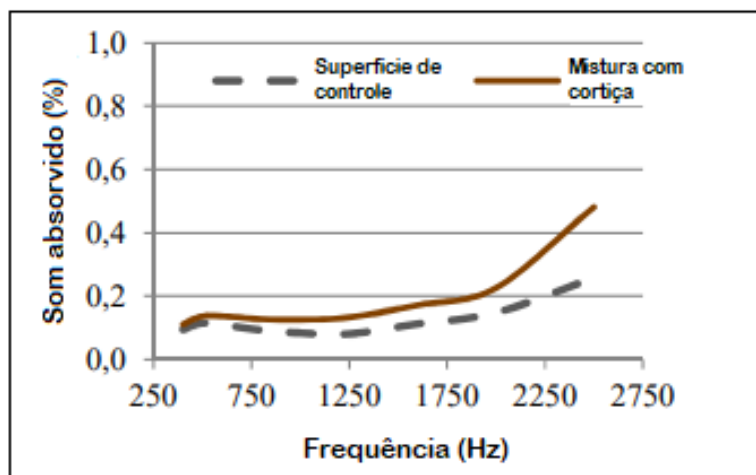


Figura 4.9 – Percentagem de som absorvido pelo pavimento composto por mistura betuminosa com cortiça para um espectro de frequências (adaptado de Freitas et al., 2012)

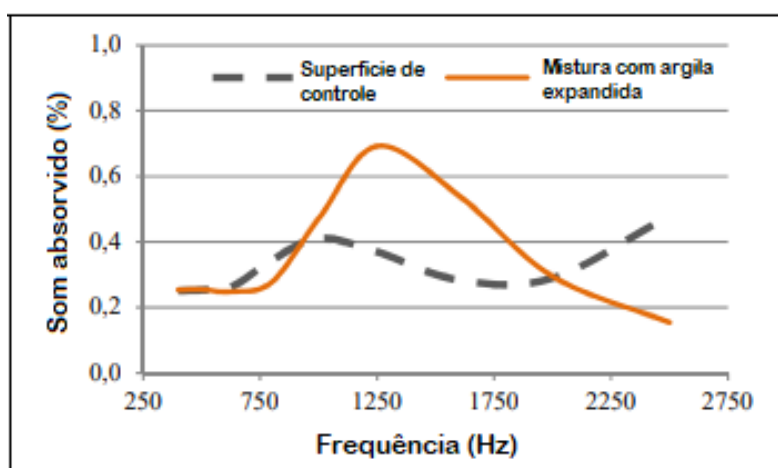


Figura 4.10 – Percentagem de som absorvido pelo pavimento composto por mistura betuminosa com argila expandida para um espectro de frequências (adaptado de Freitas et al., 2012)

Através dos resultados é possível concluir que a mistura com argila expandida tem um desempenho acústico melhor com frequências mais altas e a mistura com cortiça tem um desempenho acústico melhor para frequências mais baixas. A cortiça é o material mais eficiente, apenas tem uma volumetria de 5% face aos 10% da argila e tem uma percentagem de absorção sonora superior ao valor proporcional à quantidade que foi utilizada por volume total (Freitas, Oliveira, et al., 2012).

➤ Pavimentos rígidos

No caso dos pavimentos rígidos a ranhuração realizada na superfície da plataforma é o fator condicionante na geração de ruído e vibrações, existindo dois tipos de ranhuração, longitudinal e transversal.

A ranhuração longitudinal, tal como a representada na Figura 4.11, é benéfica para a atenuação de ruído rodoviário, porém tem como consequência a diminuição do atrito da superfície do pavimento (Wayson, 1998).



Figura 4.11 – Pavimento com ranhuração longitudinal (adaptado de Construction Connect Canada, 2023)

A ranhuração transversal pode ser considerada um elemento propício a geração de ruído com a passagem dos veículos, criando o maior nível de ruído lateral, sobretudo quando o padrão da ranhuração tem espaçamentos superiores a 26 mm.

No âmbito da redução do ruído causado pela ranhuração transversal foram realizados ensaios que indicam que a utilização de padrões de ranhuração com espaçamentos aleatórios podem diminuir o ruído originado (Wayson, 1998).

A alteração da ranhuração transversal é um dos pontos mais importantes na tentativa de atenuação de ruído dado que os pavimentos rígidos são considerados os maiores geradores de ruído (Branco et al., 2020).

Wayson (1998) considera que para além do padrão e espaçamento da ranhuração transversal, a profundidade também é um fator condicionante pois o aumento da profundidade produz uma melhoria na absorção de ruído.

O problema associado ao aumento da profundidade da ranhuração é que esta promove o enchimento das ranhuras com detritos e lixo requerendo maior manutenção.

Na Figura 4.12 apresenta-se a execução de um trabalho de ranhuração de um pavimento rígido, numa estrada nos Estados Unidos, no Estado da Pensilvânia, nas proximidades da cidade de Middletown.



Figura 4.12 – Execução de ranhuração transversal em pavimento rígido (Wagman Construction, 2024)

Os pavimentos com este tipo de ranhuração são habitualmente executados em locais com climas mais frios e têm como objetivo melhorar a aderência entre o pneu e o pavimento.

4.2.1 Comparação do desempenho acústico das camadas de desgaste flexíveis

Nos pavimentos flexíveis as misturas betuminosas utilizadas como camadas de desgaste de baixo ruído têm uma performance acústica diferente consoante a velocidade praticada pelos veículos de passagem.

Esta análise tem o objetivo de comparar o desempenho acústico de misturas betuminosas rugosa, drenante, densa, mistura de espessura fina, modificada com

borracha com diferentes dimensões de agregado, tendo como referência a mistura convencional de betão betuminoso.

Esta análise baseou-se nos estudos:

- Assessment of the Performance of Asphalt Rubber Layers on Noise Abatement (P. Pereira et al., 2006)
- Avaliação do Desempenho Acústico de Pavimentos Rodoviários (Freitas et al., 2008)
- Caracterização Acústica de Pavimentos Rodoviários e Influência na Emissão Sonora (A. H. P. Pereira, 2010);
- Definição e Características de Superfícies de Baixo Ruído (Freitas, 2013);
- Innovative Low Noise Road Pavement Materials Studied in Portugal (Freitas, Oliveira, et al., 2012).

Os valores de ruído gerados nem sempre são proporcionais para cada mistura, nesta análise comparativa procurou-se utilizar os valores de nível sonoro associados a cada uma das misturas consideradas e a sua variação.

Os valores referentes às misturas modificadas com cortiça e argila expandida não estão presentes nesta comparação porque estes foram estudados, os resultados em laboratório foram bons, mas não houve ainda hipótese de implementá-las à escala real (Freitas, Oliveira, et al., 2012).

Na Tabela 4.4 podem ser observados os valores correspondentes ao nível sonoro gerado pela passagem de um veículo ligeiro para cada uma das misturas consideradas, para as velocidades de 50, 70 e 90 km/h.

Tabela 4.4 – Níveis sonoros produzidos por diferentes misturas betuminosas em função da velocidade (adaptado de Pereira et al. (2006), Freitas et al. (2008), A. H. P. Pereira (2010), (Freitas, Oliveira, et al. (2012) e Freitas (2013))

Velocidade (km/h)	Nível sonoro produzido (dB)							
	Rugosa BBr	Drenante BDr	Esp. Fina aberta	Esp. fina fechada MDf	Modificado c/Borracha MBA BBA10	Modificado c/Borracha MBA BBA12	Betuminoso BB	Densa BD
50	71.1	67.8	64.1	64.8	69.5	72.1	70.1	70.9
70	75	71.7	67.6	68.3	73.7	76	74.4	75.2
90	77.9	75.5	70.1	70.9	76.9	78.9	77.6	81.1

Na Figura 4.13 apresenta-se o gráfico com a comparação dos valores de nível sonoro produzido em função da velocidade.

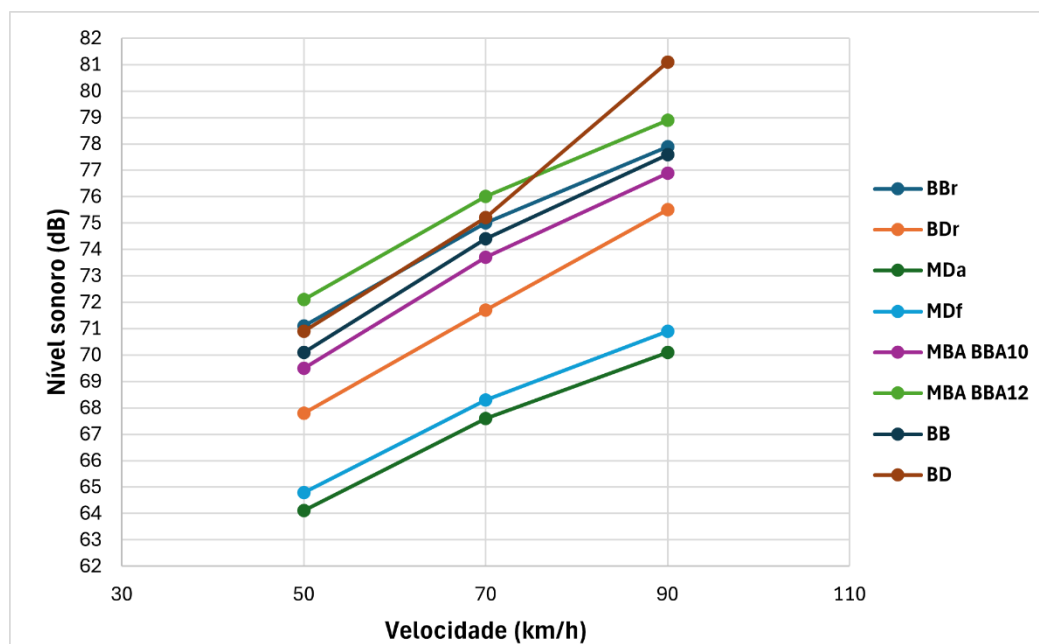


Figura 4.13 - Níveis sonoros produzidos por diferentes misturas betuminosas em função da velocidade (adaptado de Pereira et al. (2006), Freitas et al. (2008), A. H. P. Pereira (2010), (Freitas, Oliveira, et al. (2012) e Freitas (2013))

Em que:

BBr – Mistura betuminosa rugosa;

BDr – Mistura betuminosa drenante;

MDa – Mistura betuminosa em espessura fina de granulometria aberta;

MDf – Mistura betuminosa em espessura fina de granulometria fechada;

MBA BBA10 – Mistura betuminosa com betume modificado com borracha e dimensão de agregado máxima de 10 mm;

MBA BBA12 – Mistura betuminosa com betume modificado com borracha e dimensão de agregado máxima de 12 mm;

BB – Mistura betuminosa convencional;

BD – Mistura betuminosa densa.

Na Tabela 4.5 estão apresentadas as variações de nível de ruído produzido por cada mistura em função da velocidade face à mistura convencional betuminosa.

Tabela 4.5 – Variação do nível de ruído produzido por cada mistura em função da velocidade face à mistura betuminosa convencional BB (adaptado de Pereira et al. (2006), Freitas et al. (2008), A. H. P. Pereira (2010), (Freitas, Oliveira, et al. (2012) e Freitas (2013))

Velocidade (km/h)	Nível sonoro (dB)	Diferença de nível sonoro produzido face a BB (dB)						
	Betuminoso BB	Rugosa BBr	Drenante BDr	Esp. Fina aberta Mda	Esp. fina fechada MDf	Modificado c/Borracha MBA BBA10	Modificado c/Borracha MBA BBA12	Densa BD
50	70.1	+1	-2.3	-6.	-5.3	-6	+2.	+8
70	74.4	+6	-2.7	-6.8	-6.1	-7	+1.6	+8
90	77.6	+3	-2.1	-7.5	-6.7	-7	+1.3	+3.5

Analisando a Figura 4.13 é possível ter uma percepção visual do comportamento acústico das misturas. Na Tabela 4.5 estão apresentadas as variações de nível de ruído face à mistura convencional betuminosa.

A camada de espessura fina de granulometria aberta é a que obteve os melhores resultados para as três velocidades testadas, seguida pela camada de espessura fina, mas de granulometria fechada.

Estes resultados eram expectáveis dada a capacidade de absorção sonora superior das misturas porosas comparada à capacidade das densas.

Analisando as curvas do nível sonoro e da velocidade é possível concluir que não há uma relação de proporcionalidade direta entre as duas variáveis. Este tipo de solução obtém um melhor desempenho a velocidades mais altas do que a velocidades mais baixas.

A solução que teve os melhores resultados depois da camada de espessura fina foi a mistura drenante, sendo também esta uma mistura porosa.

As soluções de camada de espessura fina e de mistura drenante são as soluções que tiveram melhores resultados, porém estas não devem ser aplicadas a todo o tipo de situações devido às suas limitações para muito elevados fluxos de tráfego e velocidades reduzidas, respetivamente.

A mistura que teve o quarto melhor desempenho foi a mistura modificada com borracha e dimensão máxima de agregado de 10 mm.

Comparando os resultados desta mistura com a mesma mistura que tem uma dimensão máxima de agregado de 12 mm foi possível concluir que a que tem a dimensão máxima de 10 mm tem uma performance superior, o que indica que este valor para esta característica pode ser o ótimo, tal como foi concluído no estudo referido anteriormente referente a misturas drenantes, é algo que deve ser continuado a ser estudado para se concluir efetivamente.

A variação do desempenho entre estas duas variantes da mistura modificada com borracha pode ser analisada na Tabela 4.6. A mistura com agregado de dimensão máxima de 10 mm tem uma redução de ruído com valores na ordem dos 2.0 dB.

Tabela 4.6 – Comparação do desempenho acústico da mistura MBA BBA com diferente dimensão de agregado em função da velocidade

Variação de desempenho entre MBA BBA 12 face a MBA BBA 10 (dB)	
50 km/h	+2.6
70 km/h	+2.3
90 km/h	+2.0

No que se refere ao betão betuminoso convencional e ao rugoso, o primeiro teve um desempenho superior, algo que não era esperado, pois a mistura betuminosa rugosa tem um maior volume de vazios.

Os resultados do desempenho do betuminoso convencional são valores de referência. Para efetuar uma análise mais detalhada ao seu desempenho devem ser realizados ensaios com estes tipos de misturas com características diferentes de dimensão máxima de agregado, volume de vazios e porosidade para se poder conhecer mais detalhadamente o comportamento destas misturas face ao ruído gerado pelo tráfego.

A mistura betuminosa densa foi analisada com o intuito de demonstrar o desempenho acústico de uma mistura convencional utilizada em meio urbano para se poder comparar os níveis de ruído gerados por esta face às outras misturas.

A relação entre a velocidade e o nível de ruído gerado para esta mistura não é proporcional, com o aumento da velocidade o nível sonoro vai aumentando cada vez mais, sobretudo a velocidades superiores a 70 km/h.

4.2.2 das camadas de desgaste flexíveis em condições molhadas e secas

O desempenho das camadas de desgaste de baixo ruído pode variar consoante as condições climáticas a que estão expostas, estas podem fazer variar a volumetria dos constituintes das misturas devido a variações de temperatura e alterar a aderência e o volume de vazios com a presença de neve ou água.

Partindo da premissa de que as misturas betuminosas com maior volume de vazios têm melhor desempenho acústico, foram analisados os valores de um ensaio em que são

testadas uma mistura porosa e uma mistura densa com o intuito de analisar se o ruído gerado em condições secas e molhadas é proporcional ou se há uma aproximação de desempenho das duas misturas pela diminuição do volume de vazios do pavimento poroso por ação da água.

As características das misturas ensaiadas são apresentadas na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 – Características das misturas ensaiadas (adaptado de Freitas et al., 2009)

	Mistura Porosa	Mistura Densa
Dimensão máx de agregado	15 mm	16 mm
Quantidade de ligante	4.50%	5.10%
Porosidade	22%	1.80%
Profundidade média de textura	1.2 - 1.6 mm	0.7 - 1.0 mm

Os pavimentos foram ensaiados por veículos ligeiros a duas velocidades, uma considerada média, 80 km/h, e outra considerada alta, 110 km/h.

Na Tabela 4.8 e na Figura 4.14 é possível observar os valores de nível sonoro médio gerado nos dois tipos misturas betuminosas, com diferentes condições de aderência, considerando duas velocidades de circulação para o tráfego ligeiro.

Tabela 4.8 – Nível de ruído em camadas de desgaste com misturas densa e porosa em diferentes condições de aderência e para diferentes velocidades (adaptado de Freitas et al., 2009)

Nível sonoro (dB)	Mistura betuminosa			
	Densa		Porosa	
Velocidade (km/h)	Seca	Molhada	Seca	Molhada
80	74.9	82.5	73.5	79.6
110	79.3	86.6	76.8	83

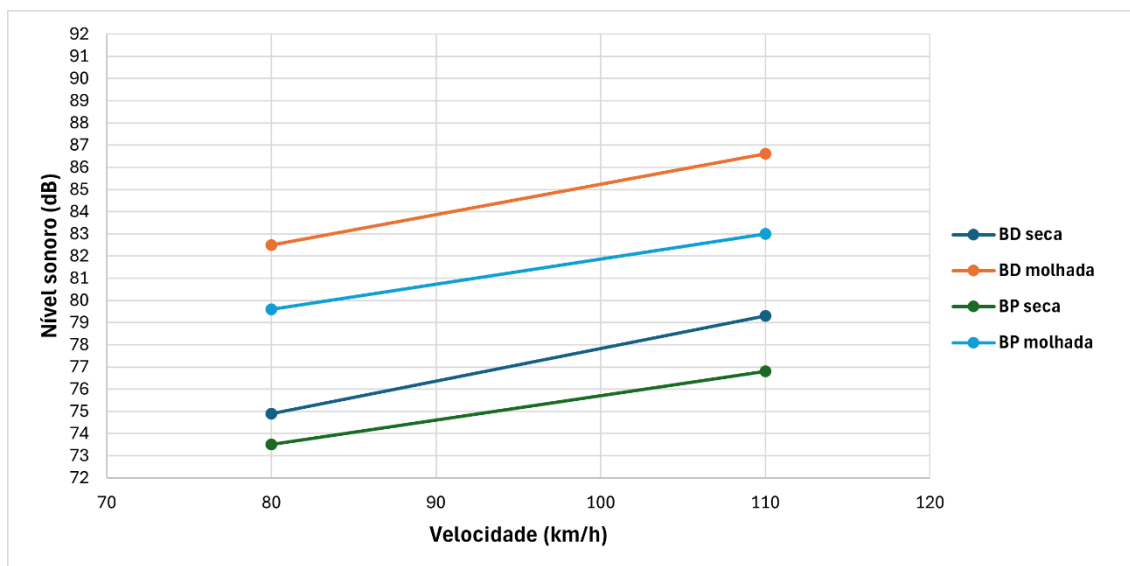


Figura 4.14 – Nível de ruído gerado por tráfego ligeiro em camadas de desgaste de misturas densa e porosa em condições secas e molhadas à velocidade de 50 e 100 km/h (adaptado de Freitas et al., 2009)

Em que:

BD seca – Mistura betuminosa densa em condições secas;

BD molhada – Mistura betuminosa densa em condições molhadas;

BP seca – Mistura betuminosa porosa em condições secas;

BP molhada – Mistura betuminosa porosa em condições molhadas.

Os dados apresentados anteriormente indicam um aumento do nível sonoro produzido pelo tráfego em condições molhadas face ao nível produzido em condições secas, para ambas as misturas.

Na Tabela 4.9 indicam-se os valores das variações de nível sonoro produzido face às condições de aderência (seca e molhada) para diferentes velocidades.

Tabela 4.9 – Variação do nível sonoro em plataforma molhada face a seca de misturas densa e porosa para diferentes velocidades

Velocidade (km/h)	Variação do nível sonoro (dB)	
	Mistura Densa	Mistura Porosa
80	+7.6	+6.1
110	+7.3	+6.2

Os resultados apresentam um maior aumento de ruído gerado em condições molhadas face a condições secas para a mistura densa e para as duas velocidades ensaiadas.

O aumento da velocidade de circulação está associado ao aumento do ruído, de acordo com estes dados esta variação é diferente para as duas misturas.

A mistura densa tem uma maior variação à velocidade média, ou seja, a existência de água na superfície tem um maior impacto no desempenho acústico do que a velocidade de circulação.

No caso da mistura porosa a diferença entre a variação de ruído gerado à velocidade de 80 e 110 km/h em condições secas e molhadas resulta apenas num acréscimo de 0.1 dB, o que aponta para que a velocidade tenha um impacto praticamente igual em condições de superfície seca e molhada.

Na Tabela 4.10 indicam-se os valores das variações de nível sonoro produzido face ao aumento de velocidade em condições seca e molhada.

Tabela 4.10 - Variação do nível sonoro devido à variação de velocidade de 80 para 110 km/h para as duas condições seca e molhada de misturas densa e porosa

Condições	Variação do nível sonoro (dB)	
	Mistura Densa	Mistura Porosa
Seca	+4.4	+3.3
Molhada	+4.1	+3.4

A existência de água na superfície pressupõe uma diminuição do volume de vazios e conseqüentemente uma diminuição no desempenho acústico da mistura porosa.

Este efeito aliado ao aumento da velocidade poderia provocar um maior aumento do nível sonoro produzido.

Analisando os dados a variação de nível sonoro devido ao aumento da velocidade de 80 para 110 km/h em condições secas e molhadas é bastante semelhante, a diferença é de 0.3 dB para a mistura densa e de 0.1 dB para a porosa.

Considera-se que a variação de velocidade apresenta um aumento proporcional em condições secas e molhadas e que a existência de água à superfície tem o mesmo incremento a nível de ruído às duas velocidades.

4.2.3 Manutenção de pavimentos

As camadas de desgaste dos pavimentos flexíveis de misturas betuminosas porosas requerem uma boa manutenção e limpeza de detritos de forma recorrente para que mantenham os seus volumes de vazios inalterados e por conseguinte a sua funcionalidade na atenuação de ruído (Wayson, 1998).

As misturas porosas também são as que sofrem mais com ciclos de gelo/degelo, pelo que pavimentos com este tipo de misturas em climas mais frios requerem um planeamento de manutenção específico para métodos de descongelamento (Wayson, 1998).

Os ciclos de gelo/degelo podem provocar anomalias como a fissuração que resulta na perda do desempenho acústico.

Os pavimentos rígidos por norma têm uma durabilidade superior à dos pavimentos flexíveis e requerem menos manutenção.

O desgaste da superfície dos pavimentos rígidos origina o polimento da superfície e esta reduz a vibração dos pneus, o que resulta na redução do nível de ruído produzido pelo contacto pneu/pavimento. A continuação do desgaste da superfície polida provoca a desagregação, nesta fase o nível de ruído aumenta, sendo necessária manutenção para repor a textura da superfície do pavimento (Wayson, 1998).

As diferentes anomalias nos pavimentos provocam diferentes alterações na camada de desgaste, pode dar-se uma deformação na superfície de rolamento ou uma variação volumétrica que altera o desempenho acústico do pavimento. Estas degradações podem ter causado uma alteração de desempenho diferente consoante a velocidade de circulação.

Na Figura 4.15 apresentam-se os resultados de um ensaio CPX (Close -Proximity Method) em que se procurou saber como varia o nível sonoro máximo produzido pelo tráfego em pavimentos com uma camada de desgaste de mistura de betão betuminoso com diferentes degradações e a três velocidades diferentes, 30, 50 e 65 km/h (Oliveira, 2016)

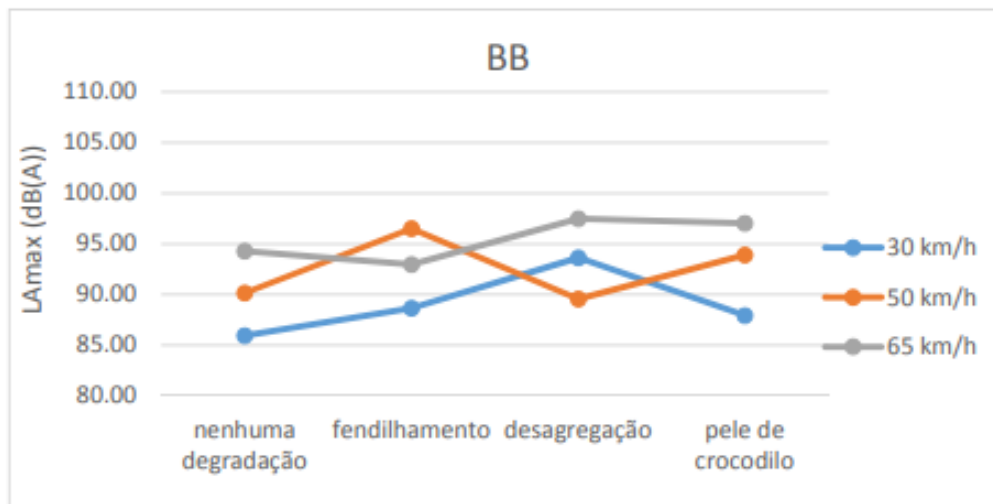


Figura 4.15 – Nível sonoro em pavimentos de mistura de betão betuminoso com diferentes anomalias (adaptado de Oliveira, 2016)

Observado os dados da Figura 4.15 conclui-se que diferentes anomalias influenciam o ruído gerado de forma diferente e a diferentes velocidades. O pavimento com fendilhamento obteve o maior nível sonoro à velocidade de 50 km/h, verificando-se que o pavimento com desagregação e o pavimento com pele de crocodilo obtiveram o maior nível sonoro à velocidade de 65 km/h.

A manutenção e reabilitação adequada para todos os tipos de pavimentos deve ser devidamente programada para que tenham uma superfície regular e sem detritos de modo a permitir a circulação de veículos em segurança e com conforto.

A existência de irregularidades promove, para além de uma perda da segurança e conforto, um aumento na geração de ruído pela passagem de rodados nas irregularidades.

4.3 Barreiras acústicas

As barreiras acústicas são uma das formas mais comuns de atenuação do ruído e vibrações produzidos pela circulação dos veículos nas infraestruturas rodoviárias.

Estas têm como objetivo atuar como um obstáculo à propagação do ruído e das vibrações e não permitir que estas sejam transmitidas livremente para a envolvente.

Existem vários tipos de barreiras com diferentes formatos com o propósito de aumentar a absorção de vibrações e adaptar-se a diferentes tipo de situações.

De acordo com as características de absorção as barreiras podem ser classificadas como refletoras, refletoras dispersivas, absorventes, naturais ou uma combinação das anteriores (Knauer et al., 2000).

As barreiras acústicas podem constituídas por elementos pré-fabricados ou por taludes artificiais, construídos com materiais orgânicos oriundos de trabalhos de terraplenagem.

A estrutura de uma barreira pré-fabricada é composta por uma fundação, uma estrutura vertical formada por três secções e pode ter a adição de um topo (Kotzen & English, 2009).

Na Figura 4.16 é apresentado um esquema da constituição desta estrutura.

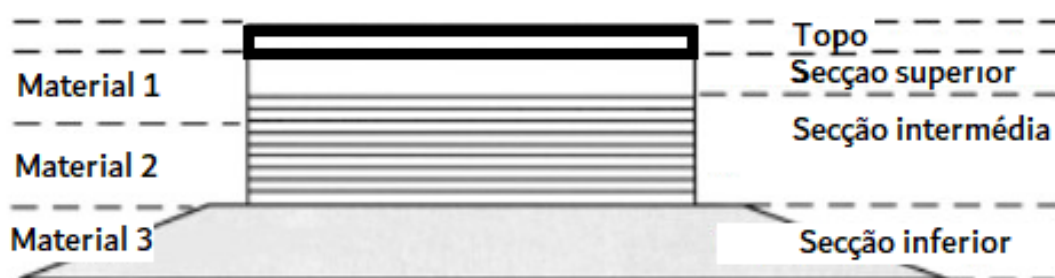


Figura 4.16 – Esquema de estrutura de barreira pré-fabricada (adaptado de Rodrigues, 2013)

A fundação pode ser fabricada de diferentes materiais e o seu formato está dependente do peso e da geometria da estrutura. Existem barreiras que são extramente leves e o formato da sua estrutura permite que sejam apenas cravadas no terreno, não requerendo uma sapata de fundação.

A estrutura vertical é composta por três secções em que cada uma tem a sua função e deve ter uma dimensão vertical apropriada.

A secção inferior idealmente deve estar enterrada sob um talude ou coberta por uma fileira de vegetação, sendo que na segunda opção é aconselhável que tenha aberturas que permitam a drenagem de água da chuva e a passagem de animais.

Esta secção tem a função de redução de ruído e utiliza a fileira de vegetação e o solo para atenuar as ondas sonoras antes destas incidirem no painel propriamente dito da barreira.

Por vezes esta fração pode estar atrás de um guarda-corpos ou de uma barreira de segurança, que interfere com a atenuação sonora, é algo que diminui a eficiência, mas em prol de um bem maior, a segurança rodoviária.

A secção intermédia deve ser a maior secção e tem a principal função de impedir a transmissibilidade de ondas sonoras para o exterior e atenuar a intensidade das mesmas.

Esta secção é a que tem maior impacto na perda de visibilidade da envolvente, pelo que podem ser utilizados materiais transparentes para o painel desta secção, de modo a permitir que o condutor tenha uma melhor referência espacial e iluminação (Kotzen & English, 2009).

A secção superior tem uma grande importância a nível funcional e de carácter estético, à semelhança da secção intermédia esta também pode ser composta por materiais transparentes para camuflar a grande dimensão e altura da barreira e o desconforto visual que pode transmitir à envolvente.

O topo é o elemento que tem maior relevância no fenómeno de transmissibilidade de ondas sonoras para o interior e exterior da via. A não utilização de um topo irá permitir que as ondas sonoras sejam difratadas sobre o cimo da barreira e que incidam sobre um recetor no exterior, a uma cota inferior à altura da barreira (Oliveira de Carvalho, 2008).

Na Figura 4.17 representa-se o cenário referido anteriormente em que existe um efeito de difração sobre a barreira.

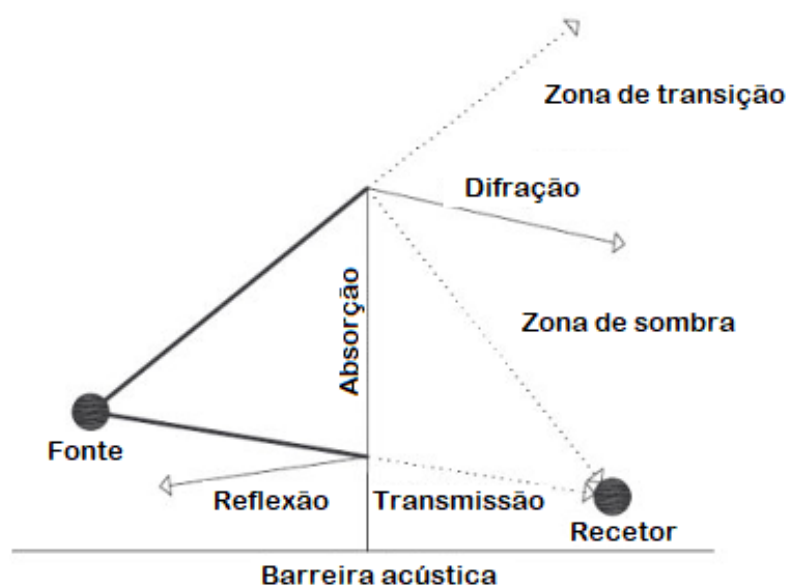


Figura 4.17 – Esquema do comportamento de ondas sonoras que incidem numa barreira acústica (adaptado de Oliveira de Carvalho, 2008)

A escolha de um topo para uma barreira deve ser feita tendo em conta a sua funcionalidade e não a componente estética, dada a relevância que este elemento tem para o desempenho acústico.

De um modo geral, os painéis das secções intermédia e superior de uma barreira são fabricados de um só material, porém em alguns casos podem ser de materiais diferentes para criar um efeito de reverberação que consequentemente atenua a intensidade do ruído.

Uma barreira pré-fabricada tem duas fachadas, estas podem ser diferentes ou idênticas dependendo do local onde vão ser colocadas. Caso sejam colocadas na berma de uma estrada, entre o emissor e o recetor, a fachada do lado interior da via deve ter uma superfície com características de atenuação sonora, caso se trate de uma barreira colocada no separador central de uma estrada, as duas fachadas devem ser iguais e ter as mesmas características de mitigação de ruído (Kotzen & English, 2009).

A escolha do tipo de barreira acústica deve ser determinada segundo as seguintes características (Knauer et al., 2000):

- Distância entre a via e a barreira, e entre a barreira e o recetor mais próximo;
- Altura prevista e aceitável para a barreira;
- A intensidade e espetro do som a mitigar;
- Peso da barreira por m²;
- Formato da barreira;
- Perfil transversal da estrada, em aterro ou escavação.

Cada tipo de barreira tem características diferentes e tem uma capacidade de ser adaptada, porém nem todas as soluções são adequadas ou podem ser compatibilizadas a qualquer cenário.

O comportamento acústico de uma barreira é caracterizado por três fatores, a sua geometria, o material de que é composta e o seu posicionamento.

4.3.1 Geometria

A geometria é o fator que determina a como se irá suceder a reflexão e difração das ondas sonoras, a capacidade absorção das mesmas e se irá haver uma perda de transmissibilidade de ruído para a envolvente.

A difusão das ondas sonoras irá ser determinada de acordo com o tipo de topo da barreira acústica, através será possível diminuir a propagação de ruído para a envolvente (Guidelines on Design of Noise Barriers, 2022).

Na Figura 4.18 podem ser observados diferentes exemplos de topos de barreiras acústicas.

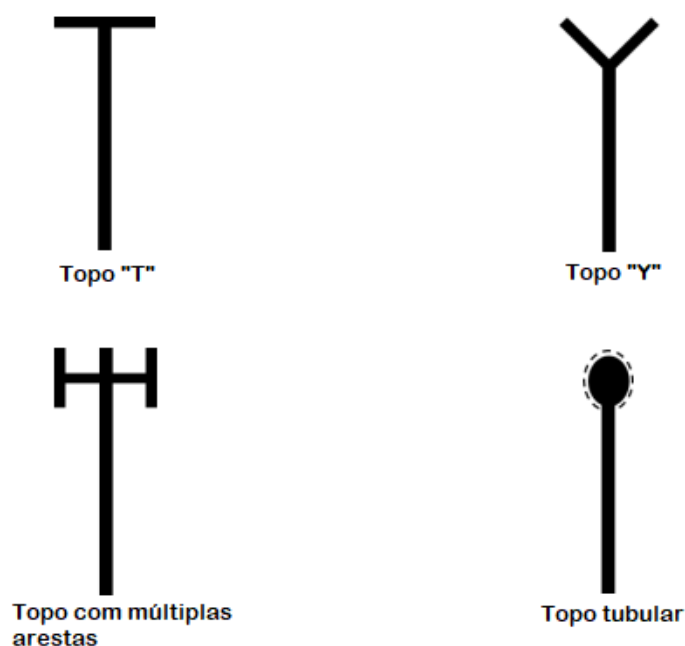


Figura 4.18 – Tipos de topos de barreiras acústicas (adaptado de Guidelines on Design of Noise Barriers, 2022)

Topos de barreira modificados em forma de “T”, “Y” ou outro tipo com arestas múltiplas produzem um efeito de “sombra” que não permite a propagação de ondas numa certa direção.

Um esquema deste efeito pode ser observado na Figura 4.19.

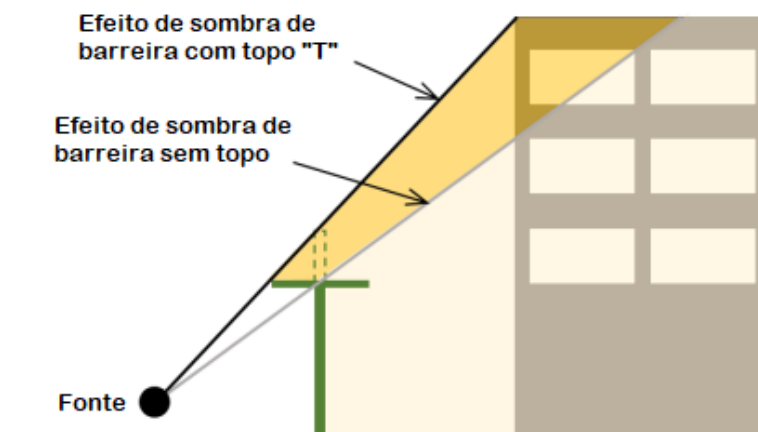


Figura 4.19 – Impedimento de propagação de ondas causado por barreira com topo “T” (adaptado de Guidelines on Design of Noise Barriers, 2022)

Comparando os esquemas da Figura 4.17 e da Figura 4.19 é possível concluir que o topo diminui o efeito de difração no cimo da barreira e atenua o ruído na zona de transição, esta é a principal vantagem e diferença da colocação de um topo numa barreira.

A secção da barreira não é uma das condicionantes pois o comportamento das ondas sonoras é definido pela geometria e materiais das superfícies (Guidelines on Design of Noise Barriers, 2022).

Um exemplo deste comportamento é comparar uma barreira esbelta e alta a uma barreira mais baixa, mas com uma secção mais larga. Este caso está figurado seguidamente na Figura 4.20, o esquema demonstra que as ondas sonoras não são influenciadas pela secção de um obstáculo, mas sim pela sua geometria.

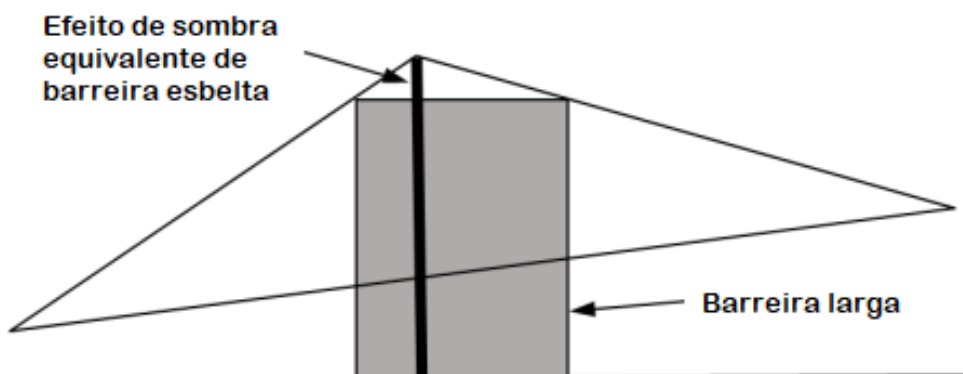


Figura 4.20 – Comparação da influência de uma secção e da geometria de uma barreira para ondas sonoras (adaptado de Guidelines on Design of Noise Barriers, 2022)

Apesar da secção da barreira não ser uma das condicionantes do desempenho acústico é importante que esta tenha um bom isolamento sonoro para evitar a transmissibilidade de ondas sonoras através da barreira.

O isolamento sonoro depende da massa da barreira, da rigidez, fatores de perda e do ângulo de incidência das ondas sonoras (Knauer et al., 2000).

Num cenário em que existam duas barreiras verticais com características geométricas idênticas colocadas na extremidade de uma infraestrutura rodoviária, intituladas de “A” e “B”, sendo que a barreira “A” tem valores de massa e rigidez superiores à barreira “B”, “A” irá ter uma capacidade de isolamento sonoro superior para um recetor que esteja localizado no exterior na via.

Valores de massa e rigidez muito elevados podem causar um efeito adverso, a reflexão de ondas sonoras para o interior da via, este fenómeno está dependente da textura da superfície da barreira.

O isolamento está também dependente da existência de aberturas ou fendas que possam permitir a passagem de ruído.

Ensaios efetuados apontam para que uma barreira com topo “T” apresenta um acréscimo de 2.5 dB ao valor redução do nível sonoro face ao valor obtido por uma barreira vertical convencional (Knauer et al., 2000).

A colocação de material poroso na superfície do topo é uma medida que aumenta o nível de ruído absorvido, ensaios com barreiras com topo em forma de “T” com esta modificação apresentaram uma redução do nível de ruído até 3 dB (Watson, 2006).

Esta medida permite que a barreira tenha uma altura menor o que a torna mais económica e mais apelativa face ao apelo estético.

A Figura 4.21 apresenta um esquema deste tipo de barreira acústica.

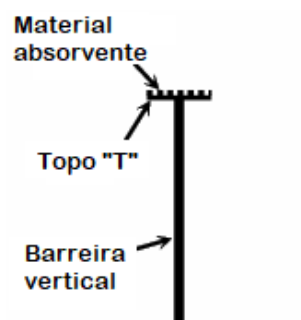


Figura 4.21 – Barreira acústica com topo em forma de T com material poroso na superfície do topo (adaptado de Watson, 2006)

A barreira de topo em forma de “Y” foi projetada para ter um maior efeito de reverberação de ondas sonoras mais complexo que a de topo em forma de “T” porém, o topo “T” demonstrou um desempenho acústico superior nos testes efetuados (Knauer et al., 2000).

O topo em “Y” também tem alguns obstáculos a nível de operação e manutenção sendo que o formato do topo requer a existência de um sistema de drenagem e limpeza recorrente devido à tendência de acumulação de detritos no topo (Knauer et al., 2000).

Uma das opções alternativas para mitigar a questão da acumulação de detritos é utilizar um topo com apenas metade do “Y”, ou seja, o topo é composto apenas por um painel com inclinação para o interior da via, de modo a manter a capacidade de sombreamento do formato “Y”. Notar que esta alternativa apenas é válida para ser colocada junto da berma exterior de uma infraestrutura rodoviária, não é adequada para ser colocada no separador central.

As barreiras com topo com múltiplas arestas também surgiram como um design alternativo ao topo “T”, mas tal como as de topo “Y” tem questões de drenagem e limpeza.

Vários testes foram feitos com barreiras com este topo incluindo variações modificadas com superfícies compostas com material absorvente, um destes ensaios concluiu que a redução de ruído era de 2.5 a 2.7 dB superior face a uma barreira vertical convencional (Fujiwara & Ishiduka, 1999).

As barreiras de topo tubular são um conceito que já foi testado com diferentes modificações, sendo que as que surgiram inicialmente foram as cilíndricas ocas compostas por betão poroso, mais tarde surgiu uma secção em formato cogumelo que obteve melhores resultados que a original cilíndrica (Watson, 2006).

A secção da barreira de topo em formato de cogumelo pode ser observada na Figura 4.22.

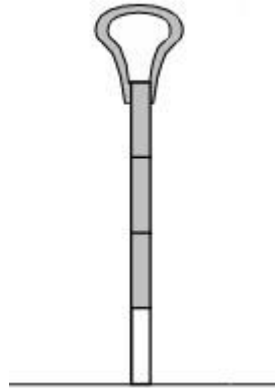


Figura 4.22 – Barreira acústica com topo em formato de cogumelo (adaptado de Watson, 2006)

A barreira de topo cilíndrico demonstrou em testes que este topo adicionava um incremento de 2 a 3 dB de redução de ruído face a uma barreira vertical convencional (Fujiwara & Furuta, 1991).

Tal como as barreiras de topo “T” também a barreira com topo em formato de cogumelo foi testada com uma superfície de topo com materiais absorventes, um estudo apontou para uma redução de ruído de 1.8 a 2.3 dB comparativamente à barreira de topo “T” (Yamamoto et al., 1995).

Segundo ensaios realizados duas barreiras com as mesmas características, uma com topo em “T” e outra com topo tubular sem material absorvente à superfície, têm o mesmo desempenho acústico (Alfredson & Du, 1995), este é um facto interessante, indica que os dois topos com superfícies refletivas promovem o mesmo efeito de sombreamento acústico e que a geometria dos dois topos apenas altera a direção das ondas sonoras, não tem um impacto significativo na sua absorção.

Uma secção de topo cilíndrico estudada que obteve resultados interessantes foi a com topo em formato de roda de água.

O topo de roda de água foi um projeto mais complexo, a secção é composta por um cilindro de acrílico, placas de alumínio dispostas como se fossem as pás de uma roda de água, ligadas ao cilindro de acrílico e com uma superfície exterior absorvente (Okubo & Fujiwara, 1998), o esquema desta secção encontra-se representado na Figura 4.23.

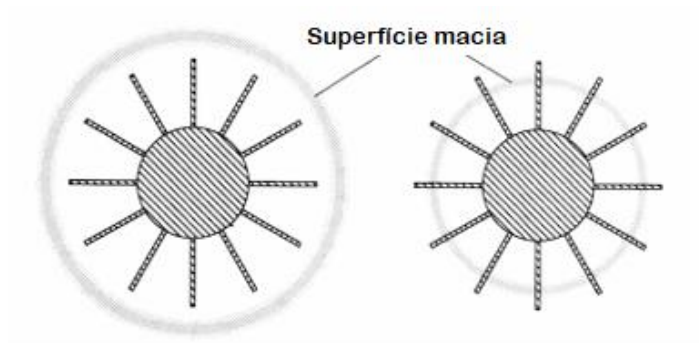


Figura 4.23 – Esquema de topo de barreira acústica cilíndrica com secção de roda de água (adaptado de Okubo & Fujiwara, 1998)

Este tipo de topo teve resultados positivos com protótipos em laboratório, mas não chegou a ser implementado na prática (Watson, 2006).

A existência de barreiras acústicas de ambos os lados da via cria um efeito de reflexão no qual as ondas sonoras ficam enclausuradas, causando um aumento de ruído no interior da estrada por consequência um sentimento incomodativo, para contrariar este efeito podem ser utilizados sistemas compostos por materiais de absorção sonora.

O fenômeno de reflexão de ondas sonoras nas barreiras acústicas está representado na Figura 4.24.

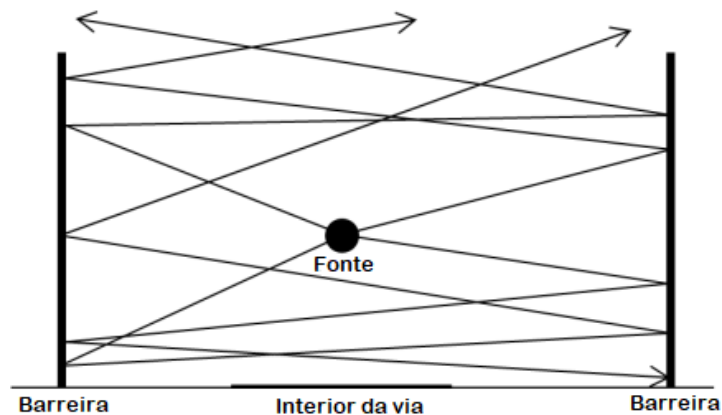


Figura 4.24 – Fenômeno de reflexão de ondas sonoras em barreiras acústicas (adaptado de Guidelines on Design of Noise Barriers, 2022)

Estes materiais também têm como objetivo absorver as vibrações que causam o ruído estrutural nas rodovias, tornando-se uma medida preventiva para a segurança da infraestrutura.

Na Figura 4.25 apresenta-se um exemplo de uma barreira com material de absorção sonora, o padrão e a superfície ondulada diminuem a energia das ondas e alteram a direção da reflexão das ondas para que o som ouvido no local tenha menor intensidade.



Figura 4.25 – Barreira acústica com material de absorção sonora (Portal Acústica, 2019)

Um método que também pode ser utilizado para mitigar o ruído criado pela reflexão de ondas sonoras nas barreiras é a inclinação dos painéis constituintes de modo a direcionar as ondas para direções diferentes e assim diminuir a intensidade.

O ângulo de inclinação de barreiras com painéis inclinados está compreendido entre os 3° e os 15° com o plano vertical, o ângulo a utilizar varia consoante a distância à fonte emissora de ruído e a distância ao recetor (Kotzen & English, 2009).

As barreiras podem ter uma inclinação para o interior ou exterior da via, estas duas opções criam diferentes fenómenos de reflexão de ondas sonoras e de efeito de sombreamento acústico.

A inclinação de barreiras tem influência no sentimento dos condutores e peões que circulem de ambos os lados da barreira, na Figura 4.26 estão apresentados esquemas das três situações que se podem suceder.

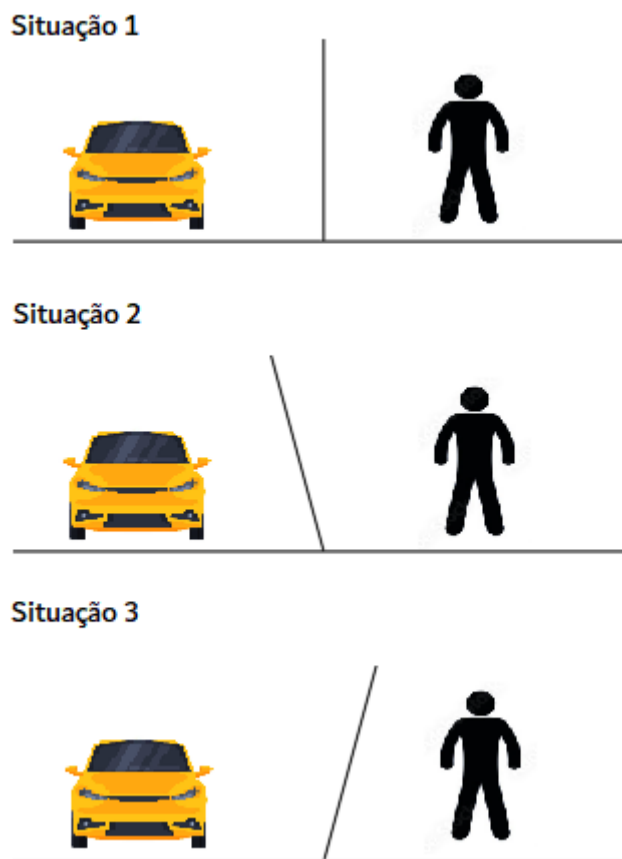


Figura 4.26 – Cenários de inclinação de barreiras verticais (adaptado de Kotzen & English, 2009)

Na situação 1 a barreira não tem inclinação, a sua existência pode causar um sentimento de enclausuramento ao condutor e ao peão.

Na situação 2 a barreira está inclinada com um ângulo máximo de 15° em direção ao interior da via, este cenário pode causar um sentimento de enclausuramento mais forte ao condutor, criando uma sensação de pouco espaço lateral disponível e perda de segurança na circulação. O peão não tem sentimento de desconforto, pode ter até uma sensação de que tem melhor visibilidade e espaço livre para se movimentar.

A situação 3 é o inverso da situação 2, a barreira está inclinada na direção do exterior da via, o condutor não tem um sentimento desconforto, tem um sentimento de conforto e uma noção de espaço lateral livre para circular em segurança, enquanto o peão pode ter um sentimento de desconforto e enclausuramento.

No que toca a barreiras inclinadas não há uma solução que seja adequada a todas as situações e que promova um sentimento de conforto e que crie um sentimento de segurança para condutores e peões em simultâneo.

O cenário em que se pode encontrar a melhor relação de espaço disponível e sentimento de conforto visual requer a existência de dois patamares a cotas diferentes, isto é, as cotas da via e do patamar exterior pedonal devem estar a cotas diferentes e a barreira deverá estar inclinada na direção do patamar mais baixo. Deste modo a diferença de cotas irá criar uma fachada inclinada apenas a uma altura que já não cria um sentimento tão forte de desconforto ou enclausuramento (Kotzen & English, 2009).

O comprimento de um destes elementos é substancial, a barreira deve ter um comprimento adequado para que a sua performance seja a desejada (Hendriks et al., 2013).

O fenómeno de difração sonora que ocorre nas extremidades da barreira não tem a mesma significância da que existe no topo da barreira, pois o solo contribui com o efeito de absorção sonora ou de reflexão de ondas para outra zona e nas extremidades não há nenhum elemento que cause o mesmo efeito (Kotzen & English, 2009).

O manual técnico de dimensionamento de barreiras acústicas da FHWA (2000) aponta um método empírico para definir o comprimento destes elementos no qual esta extensão deve ser suficiente quando o valor for igual a quatro vezes a distância perpendicular da barreira a que um ponto onde recetor se encontra.

Por convenção, de modo a prever a zona coberta pelo efeito de sombreamento de uma barreira devido ao seu comprimento traça-se uma linha com um ângulo de 160° a partir do recetor, tal como está esquematizado na Figura 4.27 (Kotzen & English, 2009).

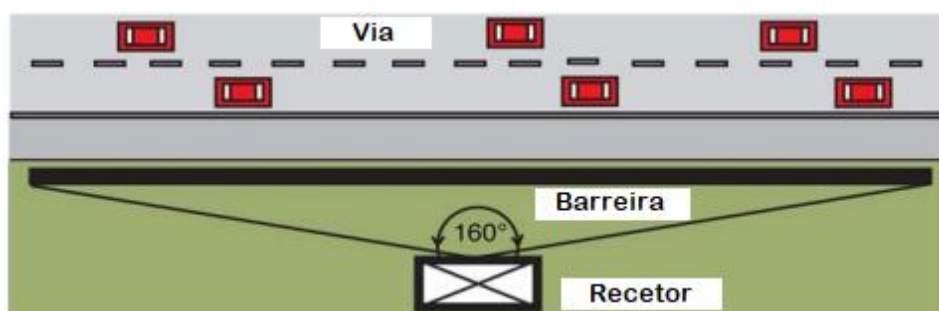


Figura 4.27 – Efeito de sombreamento criado pelo comprimento de uma barreira (adaptado de Kotzen & English, 2009)

No cenário em que haja apenas um recetor é possível reduzir o comprimento da barreira alterando as extremidades da barreira, dobrando-as para o exterior com uma extensão até à linha imaginária que faz o ângulo de 160° com o recetor pretendido (Kotzen & English, 2009). O esquema desta alteração está apresentado na Figura 4.28.

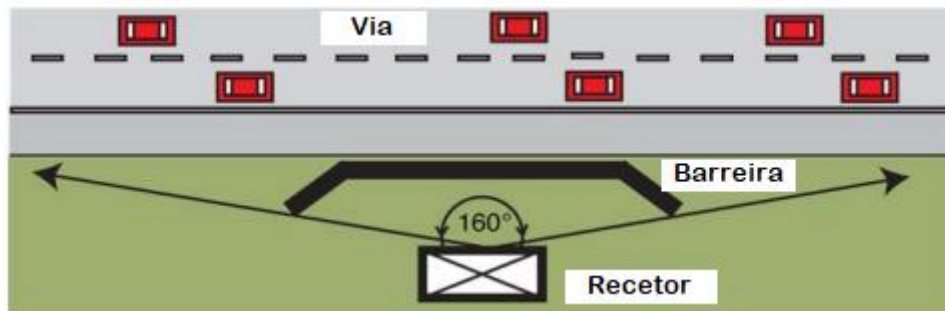


Figura 4.28 – Efeito de sombreamento criado pela barreira com extremidades modificadas (adaptado de Kotzen & English, 2009)

Uma solução de mitigação de ruído que pode ser utilizada em meio urbano é o túnel ou falso túnel.

Este tipo de construção é utilizado geralmente em meio subterrâneo com o objetivo de criação de um corredor para passagem de veículos ou peões através de um obstáculo sólido de terreno, porém pode ser utilizada uma estrutura de túnel para cobrir uma infraestrutura rodoviária e isolar o ruído gerado do exterior.

Esta solução tem um custo elevado e por norma é utilizada para isolar infraestruturas ferroviárias como viadutos ou estações onde há uma grande intensidade sonora que não deve perturbar os centros urbanos envolventes.

Um local onde foi utilizada esta solução em Portugal, em Lisboa, é no túnel que liga a Rotunda do Marquês de Pombal às Amoreiras, para além de ser um via com função de acesso direta à autoestrada A5, tem uma secção junto ao Centro Comercial Amoreiras que tem o propósito de isolar o ruído rodoviário.

Em Génova, Itália, um túnel da autoestrada E25 (Figura 4.29) serve o mesmo propósito, mas conta com painéis com material absorvente, este túnel não é subterrâneo e este isolamento promove a atenuação do ruído produzido.



Figura 4.29 – Túnel para isolamento de ruído em Génova (Kotzen & English, 2009)

A nível rodoviário a solução semelhante é a colocação de barreiras com painéis curvados para o interior da via que simulam o efeito de túnel, porém não selam o topo da via, estas barreiras são designadas de barreiras em consola.

Na Figura 4.30 está apresentado um exemplo de um destes sistemas.



Figura 4.30 – Barreira acústica em consola (SN, 2018)

4.3.2 Materiais

A característica essencial que determina o desempenho de mitigação de ruído de um material é a sua textura.

A textura da superfície é o fator que define o efeito de reflexão de ondas sonoras de uma barreira. Notar que a textura e a porosidade são características diferentes, ambas importantes para a mitigação de ruído, porém produzem efeitos diferentes, a textura influencia a reflexão de ondas e a porosidade influencia a absorção de ondas.

A textura refere o aspeto visual da superfície e a sensação ao toque, pode ser descrita como lisa, rugosa, áspera, entre outros, a porosidade indica a presença e quantidade de poros de um material.

Um fator que influencia a escolha de um material é a sua cor, há materiais que podem ser coloridos da cor pretendida e outros que não têm essa possibilidade.

A cor da superfície pode potenciar a compatibilização de uma barreira com a envolvente e dependendo do material, influenciar a sua temperatura face à radiação solar.

A escolha de uma cor adequada para uma barreira beneficia o seu aspeto visual e promove a diminuição do sentimento de enclausuramento e desconforto, tornando a barreira num elemento integrante da envolvente.

A escolha de uma cor como verde ou castanho fomentam uma aparência mais natural, cores mais vivas como o vermelho ou laranja são uma escolha ousada e desafiadora, podem ser utilizadas em padrões multicoloridos ou como uma cor sólida como uma declaração arquitetónica (Rodrigues, 2013)

A utilização de cores como branco, cinzento ou painéis transparentes podem dar uma imagem mais urbana e promover a compatibilização do elemento num meio urbano.

As barreiras podem ser fabricadas de vários materiais: betão armado, metais, alvenaria, madeira, vidro ou acrílico PMMA (polimetilmetacrilato), plástico, compósitos e outros materiais com boas características de absorção sonora como a vegetação.

A escolha do material de uma barreira deve passar por considerar a sua compatibilização visual, isto é, analisar as características do meio em questão e dos elementos existentes e escolher uma barreira composta por um material com características compatíveis.

No caso de um meio florestal deve ser procurado utilizar barreiras naturais como taludes ou bio-barreiras, que contenham materiais orgânicos coerentes com os existentes (Kotzen & English, 2009).

Um exemplo desta situação seria a utilização de uma barreira de blocos sobrepostos com espécies locais.

No caso de se tratar de um ambiente urbano seria aconselhável utilizar uma barreira de matérias inorgânicos para se integrar com as infraestruturas existentes, porém a colocação de uma barreiras com cobertura vegetal também pode ser adequada, a existência de elementos naturais no meio urbano pode ser bem-vinda à semelhança do crescimento espaços verdes citadinos que está atualmente em destaque.

Na Figura 4.31 representa-se uma zona urbana onde foi colocada uma barreira de madeira com vegetação incorporada e esta demonstra-se adequada ao local apesar de ser composta por materiais orgânicos.



Figura 4.31 – Barreira de madeira com vegetação em meio urbano (Pilebyg, 2024)

- **Betão**

As barreiras de betão podem ser classificadas como refletivas ou absorventes, de acordo com a superfície dos painéis que possuem.

Na Figura 4.32 representa-se um exemplo de uma barreira refletiva, a superfície do painel em betão é lisa, não possui nenhum tipo de padrão ou textura variável que atenua ou altere a reflexão de ondas sonoras incidentes.



Figura 4.32 – Barreira de betão armado betonada “in situ” (Knauer et al., 2000)

Este tipo de barreira da classe absorvente tem painéis compostos betão poroso ou por misturas compostas por mais que um material, betão misturado com a adição de um material com bom desempenho acústico, por norma são adicionadas fibras de madeira, fibras de borracha, argila expandida, cortiça ou agregado leve (Kotzen & English, 2009) (Farcimar, 2019).

Barreiras com painéis constituídos por misturas de dois ou mais materiais são designadas de barreiras compósitas, estas são objeto de estudo posteriormente neste capítulo.

Na ótica de melhorar o comportamento acústico os painéis são moldados com padrões à superfície e textura com alguma profundidade, aumentando o desempenho acústico com a redução das superfícies planas que beneficiam a reflexão de ondas para o interior da via.

Na Figura 4.33 apresenta-se um exemplo de uma barreira com um padrão superficial.



Figura 4.33 – Barreira acústica de betão com padrão superficial (Ecopore Advanced Solutions, 2024)

As barreiras de betão armado são uma das principais escolhas devido à sua durabilidade, resistência aos elementos, resistência a temperaturas altas e baixas, baixa manutenção requerida e facilidade de alterar as características da superfície para manipular o comportamento acústico pretendido.

O período de vida útil deste tipo de sistema é de até 40 anos, é o maior período de vida útil de todo o tipo de barreiras (Rodrigues, 2013). Apesar da elevada durabilidade não deve ser ignorada a sua manutenção e monitorização tendo em conta as condições do local onde se encontra.

As desvantagens deste material são o custo elevado de fabricação, dificuldade de adaptação a locais que requerem uma adaptação da peça de betão armado e o facto de ter de existir um controle de qualidade exigente na fabricação por ser composto por um único elemento (Guidelines on Design of Noise Barriers, 2022).

Um exemplo deste tipo de barreira pode ser observado na Figura 4.34.



Figura 4.34 – Barreira de betão armado (Farcimar, 2019)

Uma diferença que este tipo de barreira tem face aos restantes tipos de materiais é o facto de poder ser pré-fabricada ou betonada in situ (Rodrigues, 2013).

A construção “in situ” pode ser viável num local de difícil acesso aos camiões de transporte e até ser uma opção mais económica. Considerando um local de difícil acesso as barreiras a construir “in situ” não devem ser de grandes dimensões, devem ser dimensionadas para este tipo de construção, deve ser promovida uma estrutura simples e eficiente, e deverá ser executada num cenário onde o betão é produzido no local.

A Figura 4.32 representa uma barreira betonada in situ, a sua estrutura é bastante simples.

Devido à sua durabilidade e desempenho acústico este tipo de barreira é um dos mais utilizados em Portugal em infraestruturas rodoviárias.

- **Metais**

As barreiras metálicas são por norma do tipo absorvente apesar de haver soluções do tipo refletivo.

Na teoria um painel metálico é algo que é considerado como objeto com comportamento refletivo para ondas sonoras, no entanto os painéis utilizados para constituir as barreiras acústicas não são apenas chapas metálicas, estes têm uma secção constituída por diferentes materiais concebidos para absorver as ondas sonoras e reduzir a sua reflexão.

Um dos métodos que é utilizado para contrariar o comportamento refletivo dos painel metálico é utilizar chapas perfuradas (Rodrigues, 2013).

As barreiras metálicas podem ser constituídas por três materiais, aço, aço inoxidável ou alumínio.

A barreira vertical de aço deverá ser revestida com plastisóis, tinta de esmalte materiais galvanizados ou outro acabamento resistente a ferrugem. A grande vantagem do aço é ser o material mais económico dos três metais a escolher.

O aço inoxidável tem uma durabilidade elevada e uma boa resistência à corrosão, não necessita de qualquer tipo de revestimento, o que é uma grande vantagem do ponto de vista da manutenção.

O alumínio é um material com boa durabilidade, tem um bom comportamento acústico e apresenta uma resistência à corrosão notável. Por norma é anodizado para melhorar a sua resistência à corrosão.

O alumínio é o material que apresenta melhores qualidades dos três, é o metal mais leve e não enferruja, ao contrário do aço, a desvantagem que tem face aos outros dois metais é o custo que é mais elevado (Kotzen & English, 2009).

As barreiras metálicas têm vantagens como a facilidade de colocação de painéis sem necessitar de um número elevado de suportes, um rácio elevado de resistência/peso e facilidade de instalação devido ao baixo peso dos painéis.

Este tipo de barreiras pode por vezes criar problemas na vegetação pois esta não cresce bem junto dos painéis metálicos devido a estes serem aquecidos pelo sol.

O nível de atenuação de ruído e vibrações pode diminuir com altas temperaturas, devido ao efeito de expansão térmica provocado pelo calor nas juntas dos painéis.

Uma desvantagem que também pode ser considerada para este material é o fator estético das barreiras metálicas, que pode ser considerado pouco atrativo (Guidelines on Design of Noise Barriers, 2022).

Uma das estratégias para criar uma aparência mais apelativa é a utilização de padrões coloridos e de imagens, um exemplo da utilização de um padrão pode ser observado na Figura 4.35.



Figura 4.35 – Barreira acústica metálica (Isoltop, 2024)

Este tipo de barreiras tem por norma uma secção constituída por um painel perfurado na face virada para o tráfego e um painel não perfurado na face oposta, no interior é

composto por material absorvente como lã mineral de alta densidade (Kotzen & English, 2009).

A secção descrita anteriormente é a secção standard para este tipo de solução, um esquema desta pode ser observada na Figura 4.36.

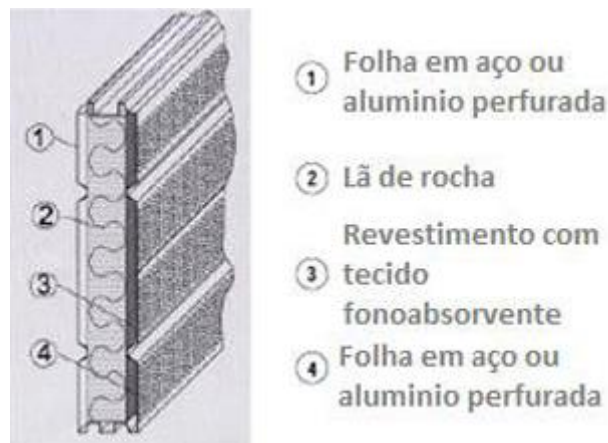


Figura 4.36 – Esquema de secção de barreira metálica absorvente (Rodrigues, 2013)

- **Alvenaria**

As barreiras de alvenaria são uma solução que surge por normalidade dado que os muros e paredes de alvenaria são um elemento corrente na construção.

À semelhança das barreiras de betão podem ser classificadas como refletivas ou absorventes e podem ser pré-fabricadas ou construídas in situ (Rodrigues, 2013).

Este tipo de solução tem como vantagem a construção requerer poucos ou nenhum equipamento pesado, no caso de ser construído in situ, construção rápida, a facilidade de compatibilização em ambientes urbanos e semi-urbanos e existir uma grande variedade de tijolos de alvenaria com diferentes texturas que permite criar uma solução que se adapte ao local de colocação com um desempenho adequado (Rodrigues, 2013).

A classificação de barreira refletiva ou absorvente está dependente do tipo de tijolo utilizado. Tijolos maciços irão criar uma superfície refletiva enquanto tijolos perfurados irão promover uma superfície absorvente (Kotzen & English, 2009).

A Figura 4.37 representa uma barreira de classe absorvente com painéis compostos por uma combinação de tijolo maciço e perfurado para criar um padrão e textura superficial variável de modo a melhorar a atenuação de ruído.



Figura 4.37 – Barreira de alvenaria (ISTIQ Noise Control, 2024)

A utilização de uma barreira refletiva composta por tijolo maciço deve ser estudada pois as características deste tipo de material aliado a uma superfície lisa podem criar um fenómeno de reflexão de ondas sonoras que aumenta o ruído em vez de o diminuir.

Não é recomendável que sejam colocadas barreiras com tijolo maciço em arruamentos estreitos pois irá haver um aumento do ruído devido à reflexão de ondas sonoras.

Em cenários em que seja utilizada esta barreira é recomendável a utilização de painéis com um padrão e textura superficial.

- **Madeira**

A utilização de madeira em barreiras acústicas tem uma forte relação com estética do local onde serão colocadas, a madeira é um material que possui uma aparência rústica difícil de ocultar, esta pode ser uma vantagem num cenário rural porém revela-se uma desvantagem em ambiente urbano, onde por norma não é compatível visualmente com o edificado existente (Kotzen & English, 2009).

O efeito de enclausuramento e imponentia criado da barreira pode ser reduzido com a diminuição da barreira, apesar de corresponder a uma diminuição significativa no seu desempenho, a sua altura é um ponto que deve ser analisado tendo em conta o ruído rodoviário e o local de colocação.

A Figura 4.38 apresenta um exemplo de uma barreira com painéis de madeira.



Figura 4.38 – Barreira acústica de madeira (Carmo Wood, 2024)

Os painéis de madeira podem ter características absorventes ou refletivas, apesar de que o desempenho das absorventes seja mediano (Rodrigues, 2013).

A madeira é um material denso, esta característica permite que a barreira tenha uma boa capacidade de redução de transmissibilidade para o exterior da via.

As barreiras de madeira revelam problemas de segurança rodoviária em caso de acidente rodoviários com colisão com a barreira.

O período de vida útil deste tipo de barreira é cerca de 20 anos, uma conservação apropriada das características do material requer a utilização de madeira tratada em autoclave, termicamente, quimicamente ou fungicamente, e durante o período de serviço requer manutenção (Kotzen & English, 2009).

Apesar das desvantagens visuais da madeira esta é um material interessante que deve ser considerado, possui características vantajosas como a sua compatibilidade com a vegetação e a compatibilidade que oferece para ser utilizada em barreiras compósitas.

Em Portugal a escolha destas barreiras é reduzida devido às desvantagens enumeradas estas razões (Rodrigues, 2013).

Em muitos países da Europa esta barreira é bastante utilizada pois é compatível com a arquitetura local de casas de madeira e grandes espaços verdes, um exemplo desta incorporação pode ser observado na Figura 4.39 onde a barreira se integra numa rua residencial.



Figura 4.39 – Barreira acústica de madeira em rua residencial (Kotzen & English, 2009)

- **Acrílico, plástico e vidro**

As barreiras transparentes surgiram como uma solução para o problema da perda de iluminação nas estradas devido à existência de barreiras.

Na ótica de permitir a passagem de luz e permitir melhor visibilidade sem requerer iluminação artificial durante o dia, estas barreiras são fabricadas de materiais transparentes tais como acrílico (PMMA), também conhecido como acrílico, podendo ser chapas de acrílico fundidas ou extrudidas, placas de plástico ou vidro temperado (Rodrigues, 2013).

A utilização deste tipo de materiais é uma escolha sustentável pois são materiais recicláveis.

Para além de beneficiar de uma melhor luminosidade, também promovem a perceção visual que se perde com habituais barreiras de betão armado ou metálicas, que podem causar uma impressão de enclausuramento.

Esta perceção visual permite também a um condutor em movimento ter uma visão mais ampla da área onde se encontra e conseqüentemente possibilitar um melhor sentido de orientação.

Muitas vezes as barreiras de materiais transparentes são coloridas com cores como o laranja com o objetivo de filtrar a de luz solar e reduzir o risco de encandeamento para os condutores.

Os painéis utilizados para estas barreiras devem ter espessuras diferentes dependendo das características do material, por norma os painéis de acrílico e plástico têm entre 15 a 20 mm de espessura e os painéis de vidro têm entre 8 a 20 mm de espessura (Rodrigues, 2013).

O vidro é um material mais resistente ao risco do que o acrílico, porém o acrílico é um material que tem uma maior resistência ao choque do que o vidro, em termos de segurança rodoviária, o acrílico é o material preferível em caso de choque com a barreira.

Muitas vezes as barreiras compostas por acrílico têm painéis curvos, isto deve-se ao facto de ao serem curvados obtêm uma maior rigidez que dispensa a necessidade de colocar elementos de suporte no topo da barreira e permite a utilização de painéis com maior comprimento (Rodrigues, 2013).

A Figura 4.40 apresenta um exemplo deste tipo de barreira de acrílico com painel curvado.



Figura 4.40 – Barreira acústica com painéis de acrílico curvados (Ray Chung Acrylic Enterprise, 2024)

Os materiais utilizados para este tipo de sistema têm um comportamento refletivo devido à densidade e à superfície plana dos painéis que são utilizados, é algo a ter em conta na escolha do tipo de barreira.

Em termos de utilização, o vidro é o material que é mais utilizado devido ao facto das placas de acrílico ficarem opacas resultado um longo período de exposição ao sol. As

placas opacas são têm uma aparência estética agradável e reduzem a visibilidade para a o exterior.

As barreiras transparentes têm desvantagens como poderem criar reflexões que encadeiam os condutores, requerem manutenção e limpeza devido ao recorrente vandalismo praticado nestes elementos e para combater a opacidade que ocorre com a exposição à luz solar (Guidelines on Design of Noise Barriers, 2022).

Notar que é recomendável a colocação de padrões com desenhos aves ou de linhas de modo a diminuir a possibilidade de haver colisões de aves com os painéis transparentes (Guidelines on Design of Noise Barriers, 2022).

Na Figura 4.41 é possível visualizar um exemplo de um painel deste tipo de material onde foi tomada esta medida.

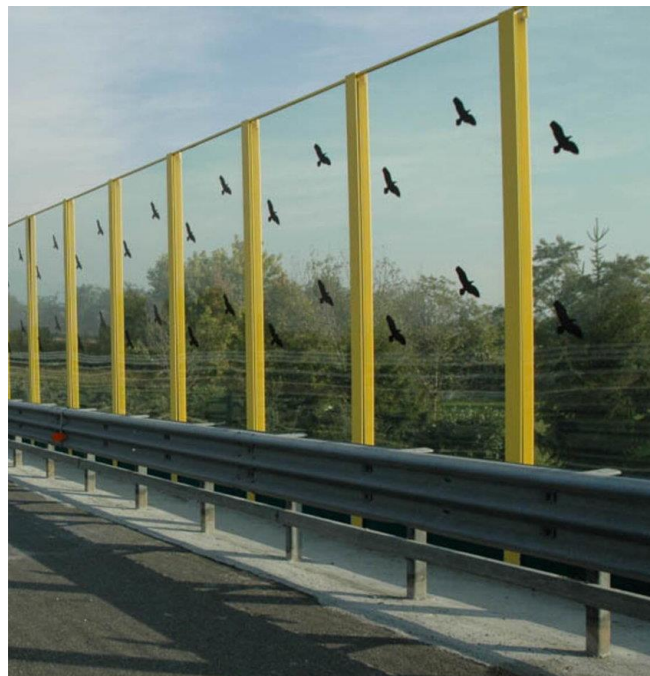


Figura 4.41 - Barreira acústica de acrílico transparente com padrão de aves (adaptado de Matis Insonorizzazioni, 2024)

- **Compósitos**

As barreiras compósitas caracterizam-se por ser constituídas por dois ou mais materiais, a utilização de vários materiais tem como objetivo potenciar as vantagens dos vários materiais numa só solução.

Semelhantes às barreiras acústicas transparentes existem barreiras deste tipo com materiais reciclados, como o plástico, resíduos de da indústria, borracha de pneus e

resíduos domésticos transformados em composto orgânico. (Guidelines on Design of Noise Barriers, 2022).

Soluções de barreiras compósitas standard têm por norma uma estrutura de suporte de betão e painéis compostos por fibra de vidro, plástico ou madeira misturada com borracha (Knauer et al., 2000).

Os materiais que podem constituir estas barreiras, como adição ao betão, são as fibras de madeira, fibras de borracha, argila expandida, cortiça e agregado leve (Kotzen & English, 2009) (Farcimar, 2019). Destas misturas a mais comum é a que utiliza fibras de madeira.

Na Figura 4.42 pode ser observado mais detalhadamente a superfície de uma barreira de betão armado com painéis de betão com adição de fibras de madeira.



Figura 4.42 – Detalhe de barreira de betão armado com painéis com adição de fibra de madeira (adaptado de Kotzen & English, 2009)

A utilização de soluções compósitas requer alguma análise pois os diferentes materiais têm requerimentos diferentes, alguns compósitos são facilmente inflamáveis e podem

arder em dias com temperaturas altas, podem ser tóxicos ou estarem suscetíveis ao aparecimento de fendas devido alterações térmicas (Knauer et al., 2000).

À semelhança da análise efetuada em projeto de edificado ao combinar dois materiais diferentes, este tipo de solução também requer que sejam avaliadas as características e a compatibilidade entre os materiais a combinar.

A utilização de materiais com reações diferentes à variação da temperatura pode ser vantajosa, ou uma fonte de anomalias, por exemplo, combinando aço e madeira pode ser uma boa ideia, estes materiais têm reações opostas com o aumento e descida da temperatura. O aumento da temperatura promove uma expansão volumétrica no aço e uma retração na madeira, e a descida da temperatura o aço sofre uma retração e a madeira uma expansão.

Neste cenário um material compensa a variação volumétrica do outro, ao utilizar dois materiais que tenham a mesma reação à temperatura irá haver uma expansão e uma retração cíclica que irá criar anomalias como a criação de fendas e reduzir a integridade e o desempenho acústico da barreira.

As vantagens deste tipo de sistema são o elevado desempenho acústico que pode atingir quando os materiais escolhidos são adequados ao local, a facilidade de compatibilização com a envolvente devido aos diferentes materiais que potencializam diferentes estéticas e a sua durabilidade (Rodrigues, 2013).

Este tipo de solução pode ser avistado com alguma facilidade em Portugal, são uma escolha que adequa facilmente a vários locais e diferentes situações.

- **Taludes e vegetação**

Para além da colocação de barreiras acústicas convencionais existem outros elementos que podem ser utilizados para atenuação do ruído rodoviário lateralmente tais como a vegetação e a utilização de taludes de escavação ou taludes artificiais, também conhecidos como motas de terra.

As motas de terra são uma solução comum para locais com risco de cheias, estes elementos têm o objetivo de servir de barreira após o nível da água subir em situações aguaceiros intensos ou fluxos excessivos.

Os taludes de terra estão dependentes de outros fatores para além da largura disponível, estão também dependentes das características do material de que são

compostos, tais como a porosidade, a coesão e a sua proveniência (Kotzen & English, 2009).

A porosidade do material é o fator que determina a capacidade de absorção de ruído e como será o comportamento das ondas sonoras ao colidir com a superfície, a coesão define a capacidade estrutural do talude e qual a inclinação necessária para assegurar estabilidade da estrutura, a proveniência determina os custos de transporte e a sua integração ou não com a envolvente, é importante que o material seja compatível como o solo local.

Apesar de serem elementos de origem natural os taludes artificiais requerem manutenção periódica pois sofrem de erosão por estarem expostos aos elementos.

Na ótica de prolongar o período de vida útil pode ser instalado um sistema de drenagem para diminuir a quantidade de água que se infiltra e que ao longo do tempo vai reduzindo a estabilidade estrutural do talude.

Uma característica recomendável para taludes artificiais é ter linhas pouco definidas, este fator promove um efeito de reflexão de ondas sonoras mais complexo que diminui a sua intensidade e reduz a sensação de confinamento criada por materiais artificiais para os utilizadores da via (Rodrigues, 2013).

A vegetação tem uma superfície porosa que pode ter uma função absorvente e funcionar como uma barreira acústica natural (Ribeiro Gonçalves, 2014).

A utilização de vegetação pode ser feita com através de vários elementos, colocação de árvores, arbustos ou com cobertura vegetal no solo ou em superfícies verticais.

A colocação de árvores é uma das opções relativas à adaptação da vegetação para efeitos de redução sonora, porém o incremento à absorção sonora resultante desta adição apenas é significativo com a utilização de um conjunto denso de arvoredo, mais nomeadamente fileiras com espessuras iguais ou superiores a 10 m.

A utilização de fileiras de árvores tem um impacto superior apenas nos níveis sonoros com frequências sonoras altas, não tem a mesma capacidade para sons de bandas de frequência mais baixas (Knauer et al., 2000).

A utilização de cobertura vegetal no solo promove a absorção sonora, é uma solução que pode ser colocada entre a fonte e a barreira vertical e reduzir o efeito de reflexão de ondas no interior da via, que é causado pelas barreiras com características refletivas.

O solo natural com função de base para a vegetação promove uma boa capacidade de absorção de ondas sonoras de baixa frequência, esta deve-se à porosidade da terra

vegetal em conjunto com elementos de vegetação caídos tais como folhas ou ramos (Kotzen & English, 2009).

Deste modo é recomendável incluir espécies de arbustos e árvores decíduas, pois a o ciclo foliar permite a continuidade de elementos de vegetação caídos no solo que promovem o bom desempenho face a ruído de baixa frequência.

A cobertura vegetal em si surte um efeito de absorção superior em ondas de altas frequências, segundo Martens (Martens, 1980), a absorção máxima é obtida quando as folhas da vegetação tem a dimensão igual ao valor de metade do comprimento de onda do ruído.

Utilizando a expressão (2.2), relativa ao comprimento de onda, com os valores:

- $c = 343 \text{ m/s}$;
- $f = 10000 \text{ Hz}$;

Obtém-se:

$$\lambda = \frac{343}{10000} = 0.0343 \text{ m} = 3.43 \text{ cm}$$

Utilizando a velocidade do som no ar e um valor médio de alta frequência (de 2000 a 20000Hz) é obtida a dimensão ótima de uma folha para que esta tenha a ação de atenuação sonora máxima. Para o cenário de referência demonstrado, a dimensão ótima é de 3.43 cm.

A utilização elementos de vegetação em barreiras verticais, designadas de bio-barreiras, consiste na incorporação de elementos de vegetação na estrutura de uma barreira de modo a aumentar a capacidade de atenuação de ruído da mesma.

Este tipo de solução surgiu na Holanda na década de 1990 como uma alternativa aos taludes artificiais que não necessitava de uma grande largura para ser aplicada (Kotzen & English, 2009).

Existem vários tipos de sistemas baseados em diferentes abordagens, as principais soluções são a barreira vertical com vegetação fixa à estrutura, a caixa de solo ou *box wall*, a barreira com salgueiro ou *willow wall* e a barreira de blocos sobrepostos ou *stack wall*.

A barreira com vegetação fixa à estrutura é uma barreira vertical composta por uma estrutura de aço corten em formato de “A” ou vertical em que a vegetação é colocada e fixa na superfície lateral da estrutura.

Esta solução apresenta uma boa durabilidade e resistência aos elementos, a estrutura de aço corten cria uma camada de ferrugem anticorrosiva que trava a corrosão do interior, protegendo e garantido a sua integridade estrutural. Esta barreira tem uma estimativa de período de vida útil de até 20 anos.

A barreira com vegetação fixa com o formato convencional tem um suporte de madeira do lado exterior à via, no caso de a barreira ter o formato “A” a vegetação é fixa de ambos os lados da estrutura, no caso da barreira vertical esta é apenas fixa do lado interior da via.

O esquema de uma barreira com vegetação fixa à estrutura com formato em “A” está representado na Figura 4.43.

Na Europa a espécie de planta que tem maior utilização neste tipo de solução é o salgueiro, é uma planta que tem um crescimento rápido, é bastante versátil em termos de adaptação a diferentes climas, tanto húmidos como secos e tem uma boa capacidade de se adaptar a diferentes locais após o transplante para um novo solo (Kotzen & English, 2009).

A desvantagem deste tipo de barreira é a manutenção que requer, esta varia tendo em conta o tipo de planta que está a ser utilizado e os respetivos cuidados de que necessita.

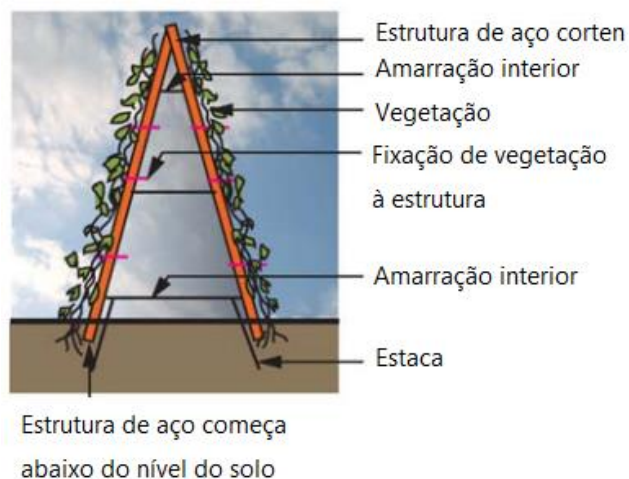


Figura 4.43 – Esquema de bio-barreira vertical com fixação de vegetação com estrutura em formato de “A” (adaptado de Kotzen & English, 2009)

A barreira designada de caixa de solo ou *box wall* consiste numa estrutura de aço com painéis com grelhas de aço que tem a função de conter uma parede de solo onde é germinada vegetação, esta cresce em direção ao exterior e contribui como se tratasse da primeira camada de atenuação sonora da barreira.

Entre a grelha e a parede de solo é colocada uma membrana geotêxtil para que o solo não saia pelas aberturas da grelha. A membrana deve ter cortes intervalados de modo a permitir a passagem das plantas do interior para o exterior da barreira.

A barreira deverá ter painéis idênticos de ambos os lados com a diferença de que apenas um deles há continuidade da estrutura para o subsolo para ligação à fundação da barreira.

A parede de solo no interior da barreira deve estar em contacto direto com o solo para que a vegetação tenha acesso aos elementos essenciais existentes no solo para que esta possa crescer e desenvolver-se.

Por norma este tipo de barreiras tem um sistema próprio de irrigação, dado que ao contrário dos restantes sistemas de bio-barreiras, esta não tem o solo de plantação em contacto com o exterior onde a chuva pode fornecer a água necessária para a manutenção da vegetação. Esta é uma das desvantagens desta solução, é sempre requerida a utilização de um sistema de irrigação no interior da barreira.

Esta barreira pode ser construída com uma altura superior a 6 m, porém a altura habitualmente adotada para este elemento está situada entre os 2 e os 4 m, com uma largura de 0.60 m.

O esquema de uma barreira estilo caixa de solo ou *box wall* está representado na Figura 4.44.

Por norma a espécie escolhida para utilizar neste tipo de sistema é a hera (hédéra hélix) devido à sua capacidade de crescimento em altura junto de elementos verticais e de ter um perfil estreito, capaz de passar pelos cortes abertos na membrana geotêxtil (Kotzen & English, 2009).

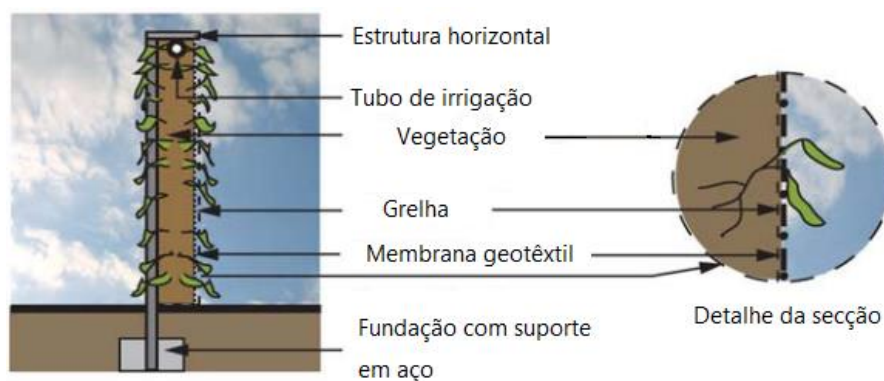


Figura 4.44 – Esquema de bio-barreira estilo caixa de solo ou *box wall* (adaptado de Kotzen & English, 2009)

A barreira com salgueiro, também designada por *willow wall*, é uma barreira vertical constituída por uma estrutura de madeira com um interior composto por placas material absorvente.

No solo são plantados salgueiros de modo a que estes cresçam junto adjacentes à superfície da barreira.

Os painéis exteriores são compostos por ripas de madeira que enclausuram o material absorvente no interior da barreira e também promovem o crescimento dos caules de salgueiro junto à barreira.

A estrutura descrita anteriormente é uma versão atual, a versão original é composta por uma estrutura de madeira com painéis em formato de grelha em que o salgueiro era plantado junto ao solo e conforme se desenvolvia ia se entrelaçando na estrutura de madeira.

A versão mais atual tem um desempenho acústico melhor devido à utilização de material absorvente no seu interior.

O salgueiro é a espécie ideal para este sistema pois o seu rápido crescimento permite que a barreira obtenha o desempenho funcional previsto num curto espaço de tempo (Kotzen & English, 2009).

Esta barreira também pode utilizar uma combinação de espécies de vegetação de modo obter uma formação com maior densidade e conseqüentemente melhor atenuação de ruído.

O esquema de uma barreira com salgueiro ou estilo *willow wall* está representado na Figura 4.45.

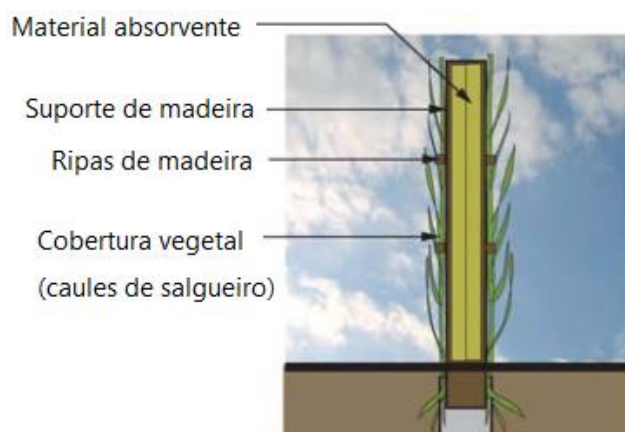


Figura 4.45 – Esquema de bio-barreira estilo com salgueiro ou *willow wall* (adaptado de Kotzen & English, 2009)

A barreira de blocos sobrepostos ou *stack wall* é, tal como o nome indica, um elemento constituído por um conjunto de blocos sobrepostos em cada bloco contém solo onde é plantada vegetação de modo a que esta cresça para o exterior e cubra a superfície lateral da barreira.

Este tipo de sistema permite a utilização de vários tipos de materiais e componentes, a primeira solução deste estilo de barreira que surgiu era composta por manilhas pré-fabricadas de betão sobrepostas e naturalmente, foram surgindo alternativas com elementos fabricados com o propósito de conter vegetação e tipos de estruturas mais leves e com uma aparência estética mais apelativa.

Uma das soluções mais comuns deste tipo é a utilização de uma estrutura de aço galvanizado com formato em “A”, tal como a utilizada para barreiras com fixação de vegetação, com níveis de prateleiras para colocação de vegetação (Kotzen & English, 2009). Na Figura 4.46 representa-se um esquema deste estilo de barreira com uma estrutura em forma “A” com prateleiras para colocação de vegetação

As fundações necessárias para este tipo de barreira dependem dos componentes e materiais utilizados, no caso de se utilizar uma estrutura de aço em formato “A”, apenas é necessária a cravação dos perfis no solo.

Esta barreira pode requerer um sistema de irrigação dependendo das espécies plantadas e do clima local, no que toca à manutenção, esta difere de solução para solução e de acordo com as espécies utilizadas. Numa situação em que a solução esteja bem dimensionada pode requerer pouca manutenção e ser um sistema de mitigação de ruído bastante eficaz.

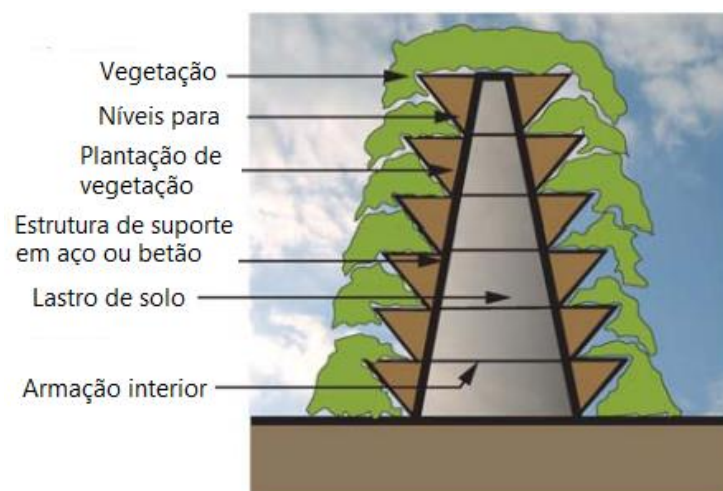


Figura 4.46 – Esquema de bio-barreira estilo blocos sobrepostos ou *stack wall* (adaptado de Kotzen & English, 2009)

Os sistemas bio-barreiras podem ser considerados para diversas situações, porém devem ser considerados os seguintes características locais (Kotzen & English, 2009):

- Compatibilidade com vegetação e solo existente na envolvente;
- Densidade da vegetação local, de modo a promover uma divisão de recursos naturais essenciais entre a nova vegetação e a existente;
- Necessidade ou não de instalação de sistema de irrigação;
- Necessidade ou não de manutenção da(s) espécie(s) de vegetação, tal como a necessidade de adicionar químicos ou substituição de plantas mortas.

Comparando este tipo de solução aos taludes artificiais a vantagem encontra-se no espaço lateral necessário, as bio-barreiras podem ser colocadas na berma de uma estrada ocupando uma largura reduzida enquanto as barreiras naturais de terra requerem uma grande quantidade de espaço para cumprir a altura necessária para criar um efeito de sombra na envolvente.

Na Figura 4.47 apresenta-se um esquema representativo desta comparação.

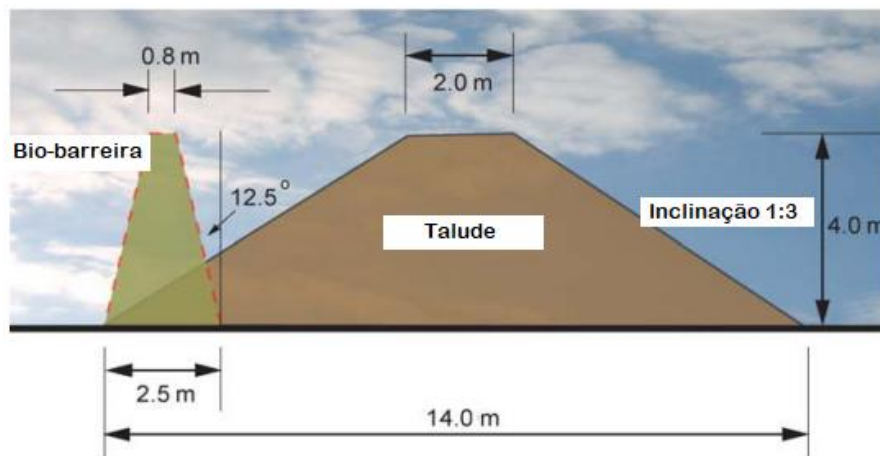


Figura 4.47 – Esquema comparativo do espaço lateral necessário para uma bio-barreira convencional e para um talude artificial (adaptado de Kotzen & English, 2009)

A colocação de arbustos pode ser utilizada como um elemento adicional às fileiras de arvoredo ou integrado na cobertura vegetal junto ao solo.

Estes elementos têm a desvantagem de não ter a altura necessária para criar um efeito de sombreamento como o criado pelas árvores, mas podem ser uma adição importante devido à sua folhagem que promove uma atenuação sonora a uma altura do solo que

por norma não é coberta de forma tão eficaz pelas árvores, que têm a folhagem a uma maior altura do solo nem pela cobertura vegetal do solo.

A vegetação é uma solução que pode ser útil em várias situações devido à sua capacidade de atenuação sonora e estética apelativa porém tem desvantagens como requerer um bom planeamento de manutenção para que se mantenha em boas condições. Nesse sentido, é importante ser alvo de uma escolha criteriosa quanto à(s) espécie(s), para que se ajustem à zona e ao clima local, depende também de como é o ciclo foliar e da possibilidade de requerer da colocação de um sistema de rega.

O principal motivo de escolha de um sistema de cobertura vegetal para atenuação sonora é a componente estética, a capacidade que este tipo de solução tem de ser compatibilizada num meio rural ou urbano com características mais naturais.

A sua aparência promove uma visão mais natural, ao contrário de outros materiais que podem criar uma envolvente artificial e criar um sentimento de enclausuramento.

A utilização de taludes para mitigar os ruídos e vibrações baseia-se na mesma metodologia da vegetação com a introdução do conceito geométrico mencionado anteriormente, no qual a altura de um obstáculo cria um “sombreamento” na difusão das ondas sonoras (Guidelines on Design of Noise Barriers, 2022).

O conceito de sombreamento está esquematizado na Figura 4.48.

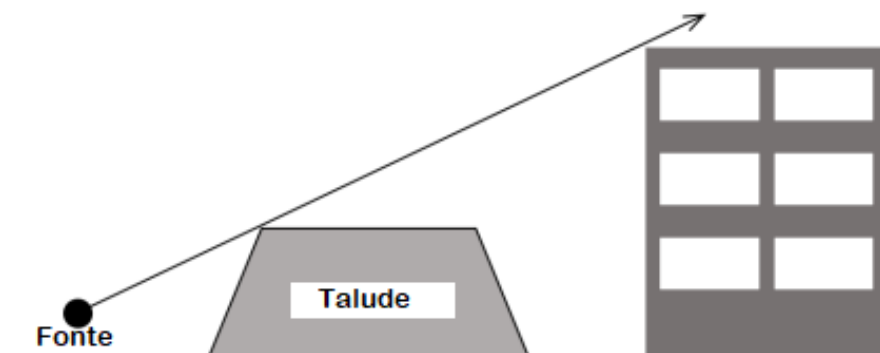


Figura 4.48 – Esquema da utilização de taludes como barreiras acústicas (adaptado de Guidelines on Design of Noise Barriers, 2022)

A altura de uma barreira é um fator essencial para a atenuação de ruído pois esta é uma condicionante da difusão de ondas sonoras, tal como descrito anteriormente o efeito que esta produz face ao efeito caudado pela área de secção do elemento.

A altura dos elementos pode variar ao longo do comprimento de acordo com as necessidades do local, custo associado, efeito estético, requisitos das fundações e da topografia no local (Ribeiro Gonçalves, 2014).

Comparando as barreiras verticais pré-fabricadas e os taludes artificiais, a grande diferença está na área requerida para instalação/construção, os taludes requerem uma largura lateral disponível considerável para vencer a altura necessária, tal como foi referido anteriormente na comparação entre bio-barreiras e taludes artificiais.

Na Figura 4.49 é possível observar um esquema que indica a largura necessária para que um talude tenha a mesma altura que uma barreira vertical convencional.

Analisando a figura, conclui-se que para atingir uma altura de 7 m o talude necessita de uma largura de 32.5 m, esta é uma grande diferença face à barreira convencional que não requer um aumento de largura para atingir uma altura elevada.

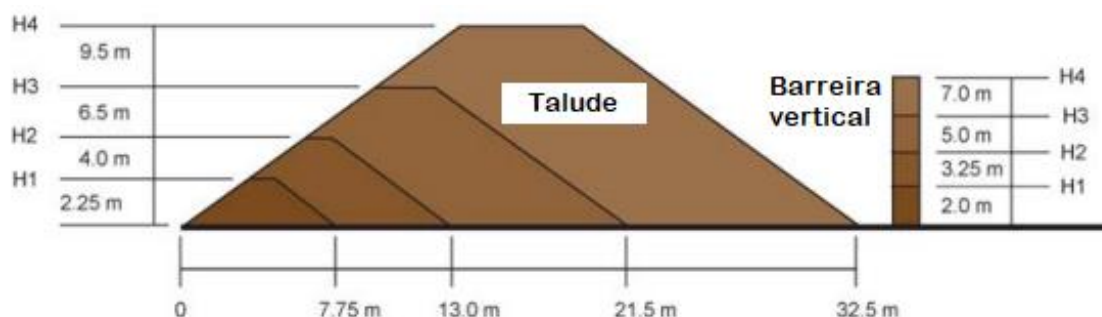


Figura 4.49 – Esquema comparativo do espaço lateral necessário para uma barreira vertical convencional e para um talude artificial (adaptado de Kotzen & English, 2009)

Antes de serem colocadas barreiras acústicas com materiais pré-fabricados, deve ser sempre verificada a possibilidade de criar barreiras com os materiais naturais oriundos das próprias terraplenagens, simulando taludes de escavação artificiais, desde que exista espaço físico suficiente.

4.3.3 Posicionamento

O posicionamento de um sistema de barreiras acústicas é caracterizado por dois fatores, a distância em relação ao limite da berma e pela configuração da própria barreira.

Segundo vários autores não há distância ideal para colocação das barreiras acústicas, estas podem ser colocadas o mais perto possível da fonte, ou seja, junto da berma de uma rodovia, ou podem ser colocadas perto do recetor (Kotzen & English, 2009), tal como está apresentado na Figura 4.50.

Estas duas metodologias de escolha de local de colocação representam duas abordagens diferentes ao problema do ruído, a colocação na berma pretende isolar o ruído na estrada para que este não seja transmitido para a envolvente, e a colocação na junto do recetor foca-se na proteção de um recetor do ruído produzido na sua vizinhança.

Por norma a colocação de barreiras junto da fonte é feita em meios muito populosos, de modo a reduzir o ruído diretamente na fonte, enquanto a colocação de barreiras junto do recetor é feita em meios onde há um só ou uma pequena quantidade de recetores localizada, para que haja uma proteção mais efetiva do local onde se encontra o recetor.



Figura 4.50 – Esquema de colocação de barreira vertical em infraestrutura rodoviária (adaptado de Kotzen & English, 2009)

No cenário em que uma via se encontra em escavação a barreira deve ser instalada no topo do talude (Kotzen & English, 2009), tal como está apresentado na Figura 4.51.

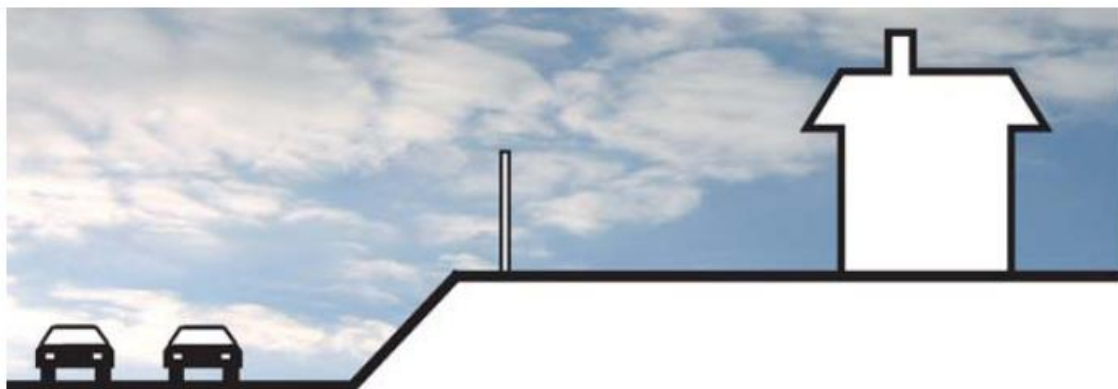


Figura 4.51 - Esquema de colocação de barreira vertical em infraestrutura rodoviária em zona de escavação (adaptado de Kotzen & English, 2009)

A barreira no topo do talude pode ser um obstáculo visual e neste tipo de situação deve ser estipulada uma solução que potencie a otimização acústica e visual, como por exemplo a utilização de barreiras transparentes.

Cada situação necessita de ser estudada para que se verifique a maior atenuação de ruído possível.

O posicionamento de um sistema de barreiras acústicas pode não ser apenas uma linha contínua de elementos idênticos com a mesma dimensão, um sistema deve ser planeado de modo a produzir a atenuação objetiva tendo em conta o ruído gerado, as características da envolvente e da infraestrutura rodoviária.

Não existe um esquema ideal de barreiras que pode ser posicionado num local, cada local deve ser analisado e estudada uma solução que se adequa às necessidades específicas da área.

A criação de um bom sistema de atenuação de ruído promove a escolha de diferentes tipos de barreiras, pré-fabricadas e cobertura vegetal, e que tenham um arranjo apropriado ao local, em termo de desempenho e visibilidade.

Sistemas constituídos por barreiras pré-fabricadas e vegetais atenuam o fenómeno de reflexão de ondas sonoras devido às diferentes superfícies que possuem, este efeito também pode ser obtido pela utilização de barreiras com secções de painéis fabricados de materiais diferentes.

A utilização de vegetação é encorajada pois é um elemento que para além de ter um bom desempenho acústico tem um carácter estético apelativo, que é apreciado em todo o tipo de meios e também porque se trata de um material sustentável.

O arranjo das barreiras pode ser em uma ou duas fileiras, no caso de ter duas fileiras os espaços entre os elementos de uma fileira devem ser cobertos por elementos da segunda fileira, estudos apontam para que esta configuração tenha um efeito de mitigar o som transmitido entre estas aberturas (Kotzen & English, 2009).

A visibilidade é um fator importante, tal como mencionado anteriormente, a utilização de barreiras com secções transparentes ou janelas é algo que pode influenciar positivamente a circulação, permitindo a entrada de luminosidade e beneficiando o sentido de orientação.

As configurações de barreiras podem ser contínua, contínua com secções transparentes, em zig-zag, em degrau ou duas fileiras paralelas escalonadas (Rodrigues, 2013).

Os esquemas das configurações estão apresentados na Figura 4.52.

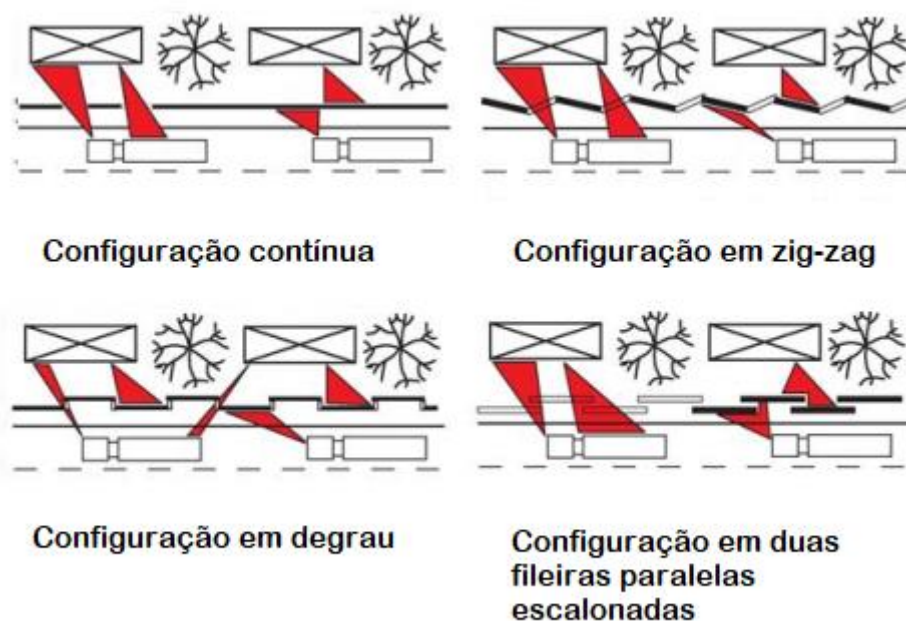


Figura 4.52 – Esquemas de configurações de barreiras acústicas (adaptado de Kotzen & English, 2009)

As medidas de mitigação de ruído a aplicar em edifícios residenciais na envolvente de uma infraestrutura rodoviária, podem ser de dois tipos, o reforço das envolventes opacas e o reforço dos vãos envidraçados exteriores (Knauer et al., 2000).

O reforço da envolvente opaca tem duas vertentes, o aumento da massa do elemento para aumentar a densidade ou a duplicação do pano da fachada para parede dupla, caso se trate de uma parede simples.

No que toca aos vãos envidraçados há a possibilidade de colocação de uma janela dupla e da colocação de caixilhos de melhor qualidade para aumentar a perda de transmissibilidade sonora e diminuir as aberturas que possam permitir a passagem de ondas sonoras.

4.3.4 Comparação de desempenho de barreiras acústicas de diferentes materiais

O desempenho dos materiais utilizados para barreiras acústicas pode variar bastante, foram utilizados resultados de ensaios para se fazer uma análise sobre a capacidade de perda de transmissão para o exterior de barreiras de diferentes materiais.

Os materiais testados foram:

- Acrílico (PMMA);
- Bloco de betão leve;
- Betão denso;
- Betão leve;
- Tijolo de alvenaria;
- Aço;
- Alumínio;
- Madeira;
- Contraplacado;
- Painel absorvente com poliéster e uma placa metálica.

Para os ensaios realizados foram utilizadas barreiras utilizadas de diferentes espessuras pois esta não é uma característica que define o comportamento acústico.

Na Figura 4.53 podem ser observados os valores da perda de transmissão de aferidos para diferentes materiais, na Tabela 4.11 apresentam-se as espessuras e densidades dos mesmos.

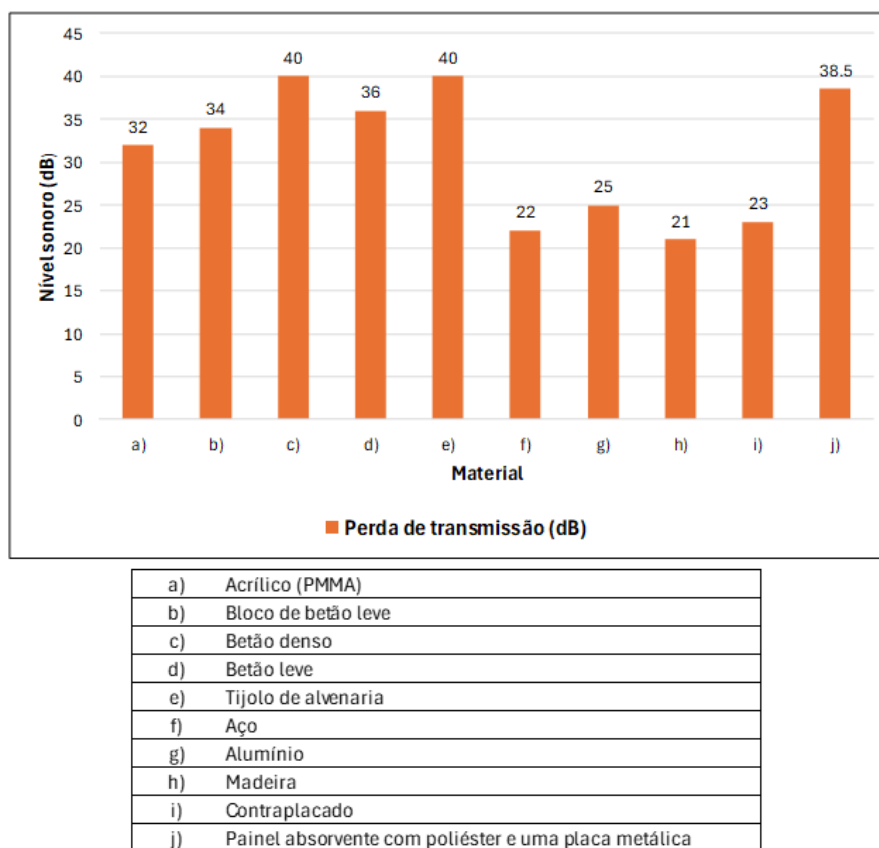


Figura 4.53 – Desempenho acústico de diferentes materiais utilizados para barreiras acústicas (adaptado de Guidelines on Design of Noise Barriers, 2022)

Tabela 4.11 – Espessura e densidade dos materiais testados (adaptado de Guidelines on Design of Noise Barriers, 2022)

Material	Espessura (mm)	Densidade (kg/m ²)
Acrílico (PMMA)	15	18
Bloco de betão leve	200	151
Betão denso	100	244
Betão leve	100	161
Tijolo de alvenaria	150	288
Aço	0.95	7.3
Alumínio	3.18	8.8
Madeira	25	18
Contraplacado	25	16.1
Painel absorvente com poliéster e uma placa metálica	87.5	25

Através dos valores apresentados na Figura 4.53 é possível concluir que os materiais que têm o melhor comportamento de absorção isolamento sonoro são o betão denso e o tijolo de alvenaria

O material que apresenta o segundo melhor comportamento é o painel absorvente com poliéster e placa metálica, esta é uma das soluções mais atuais que promove não só a perda de transmissão para o exterior da infraestrutura rodoviária como também a diminuição da intensidade das ondas sonoras refletidas para o interior da via.

O betão leve é o material que aponta o terceiro melhor desempenho na redução de ruído, a grande diferença deste material para o betão denso que teve o melhor desempenho é a densidade, tal como é possível verificar na Tabela 4.11, o que indica que um maior valor de densidade apresenta uma maior perda de transmissão de ondas sonoras para este tipo de material.

O acrílico apresenta uma perda de transmissão de 32 dB, este material tem uma porosidade muito baixa e esta característica promove uma reflexão de ondas sonoras para o interior da via.

Os restantes materiais apresentam todos uma menor perda de transmissibilidade de ruído para o exterior, estes materiais são os metais, a madeira e derivados da madeira. Esta diferença entre valores pode ser causada pela inferior densidade e ou porosidade destes materiais face aos que tiveram melhores resultados.

Será requerida uma pesquisa futura mais detalhada com a realização ensaios de diferente natureza para apurar qual o efeito destas propriedades para obtenção de um resultado melhor de perda de transmissibilidade.

Na Figura 4.54 é possível observar um gráfico que compara os resultados do desempenho acústico com a densidade do material.

Analisando este gráfico é possível constatar que o acrílico é o único material que teve um resultado mais otimista com uma densidade relativamente baixa.

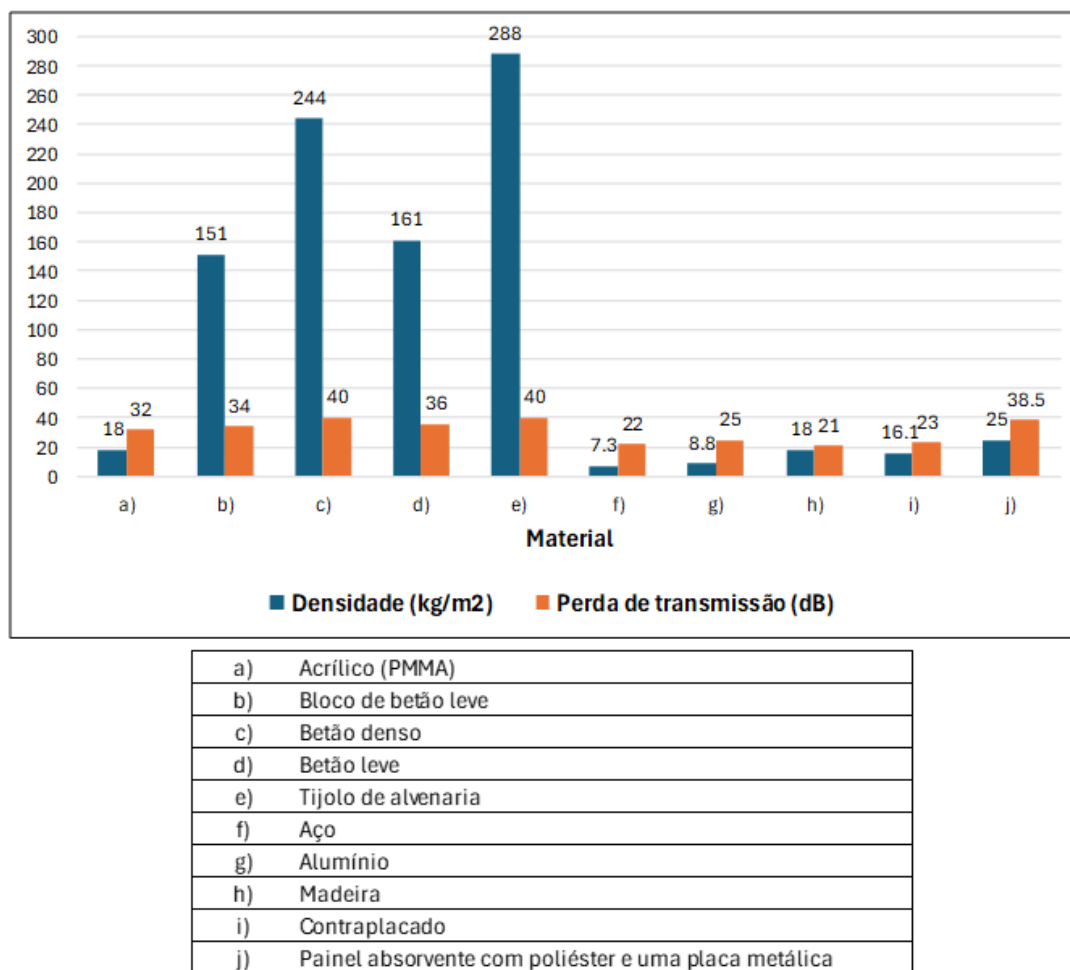


Figura 4.54 – Comparação do desempenho acústico e densidade característica de diferentes materiais utilizados para barreiras acústicas (adaptado de Guidelines on Design of Noise Barriers, 2022)

Para além da densidade é relevante estudar outras características para entender esta semelhança de valores e a variação nos resultados de perda de transmissão sonora.

Um valor de densidade superior aumenta a capacidade de reflexão de uma superfície, porém o desempenho acústico está dependente da geometria e da textura para definição do tipo de propagação de ondas sonoras que irá suceder.

A geometria da barreira irá definir o ângulo da reflexão de ondas, porém a textura da superfície irá ditar a capacidade de absorção de som e se haverá apenas um ou mais ângulos de reflexão.

5. Conclusões e Desenvolvimentos Futuros

O ruído e as vibrações são fenómenos físicos que podem afetar os seres humanos, causando distúrbios no quotidiano das populações e estar na origem de problemas de saúde, podendo no caso das infraestruturas, colocar em risco a sua estabilidade estrutural.

O ruído originado pelo contacto pneu-pavimento é o tipo de ruído que mais contribui para a poluição sonora, verificando-se que a elevadas velocidades assume um nível muito próximo do valor total de ruído gerado por um veículo em circulação.

Tendo em consideração este facto, torna-se importante atuar diretamente na fonte do ruído, sendo uma das principais medidas de minimização a aplicação de uma camada de desgaste de baixo ruído.

Segundo os dados de vários estudos realizados por diversas entidades no âmbito da análise de desempenho acústico de diferentes misturas betuminosas, as camadas de desgaste de espessura fina foram as que obtiveram melhores resultados.

Contudo, esta solução apresenta alguma fragilidade quando submetida a volumes de tráfego elevados.

Este tipo de solução obteve uma redução de som gerado de 7.5 dB face a uma camada de desgaste de betão betuminoso convencional.

A mistura que obteve o segundo melhor desempenho foi a mistura drenante. Este tipo de mistura também tem uma contrariedade, pois sofre uma degradação acentuada com circulação de tráfego a velocidades reduzidas e com infraestruturas com características de traçado mais sinuosas, ou seja, com a utilização de raios com valores reduzidos nas curvas em planta.

A solução que se apresenta mais polivalente, sem adversidades quanto ao traçado ou ao volume de tráfego, é a mistura com ligante modificado com borracha, obtendo uma redução de ruído de cerca de 0.7 dB face ao betão betuminoso convencional.

No que se refere às misturas com ligante modificado com borracha foi detetada uma característica que se pode revelar significativa quanto à dimensão máxima de agregado. Para as misturas com agregados de 10 e 12 mm, foi a mistura com a dimensão máxima de agregado de 10 mm que obteve melhores resultados, com uma redução de ruído de

cerca de 2 a 2.6 dB, sendo que a maior variação é obtida à velocidade testada mais baixa, correspondente a 50 km/h.

A mistura betuminosa densa tem um desempenho acústico bastante fraco, algo esperado devido à sua textura densa e ao baixo volume de vazios, características importantes para o efeito de redução de ruído.

De acordo com os resultados de estudos realizados com o objetivo de adicionar fibras ou pellets na mistura betuminosa, verifica-se que os mesmos apresentam benefícios para a redução de ruído. No entanto a porosidade e a granulometria são propriedades que têm um maior impacto no desempenho da camada de desgaste, pelo que a adição deste tipo de elementos deve ter em vista outro tipo de parâmetros do pavimento, como por exemplo o incremento da resistência à fadiga no caso da adição de borracha.

Na escolha de uma camada de desgaste de baixo ruído devem ser contempladas as suas características de funcionalidade face ao clima local, velocidade de circulação, fluxo de tráfego, tipo de veículos em circulação e traçado da via, entre outros, ou seja, a escolha da camada de desgaste deve ter em consideração as propriedades que sejam mais adequadas às características locais.

Considera-se que a manutenção é um dos fatores essenciais para que um pavimento mantenha o seu efeito de mitigação de ruído e que não há uma relação de proporcionalidade entre a velocidade de circulação em pavimentos degradados e o nível de ruído gerado, aspeto que é transversal aos diferentes tipos de anomalias em camadas de desgaste

Considerando os resultados dos estudos realizados sobre o ruído gerado pela passagem de veículos em pavimentos de mistura porosa e densa, e em condições seca e molhada, concluiu-se que em condições molhadas, à mesma velocidade, o ruído emitido considerando uma camada de desgaste de mistura densa é superior.

Comparando os resultados dos ensaios realizados, para as misturas densa e porosa, com a existência de água na plataforma e do aumento da velocidade, conclui-se que a existência de água causa um maior aumento do ruído.

Segundo os resultados analisados, é possível concluir que o aumento da velocidade e a alteração das condições de aderência provocam aumentos proporcionais no ruído para cada tipo de mistura. Ou seja, o impacto do aumento da velocidade em uma plataforma seca é semelhante ao impacto do aumento da velocidade em uma plataforma molhada, assim como o efeito da mudança de circulação de condições de aderência seca para molhada.

Barreiras acústicas, estas têm dois tipos de atuação, o isolamento e perda de transmissibilidade de ruído para o exterior, e a absorção sonora.

As barreiras acústicas são um sistema amplamente utilizado devido à sua adaptabilidade a diferentes situações e possibilidade de alterar o desempenho com alguma facilidade, alterando a altura ou o topo da barreira. Este sistema pode ser utilizado em diversos contextos, mas é ideal para vias com circulação até velocidades de gama média.

A perda de transmissibilidade é superior em barreiras compostas por materiais com maior densidade e rigidez, sendo a absorção sonora obtida em barreiras compostas por materiais porosos e superfícies com padrões de textura irregulares.

Os dados analisados referentes a ensaios de perda de transmissão para a envolvente exterior refletem a consideração anterior, sendo o betão denso e o tijolo de alvenaria os materiais ensaiados que demonstraram melhores resultados.

A barreira composta por painéis absorventes foi a que obteve o segundo melhor resultado, o que indica que materiais com características absorventes também têm uma capacidade de perda de transmissibilidade, apesar da sua densidade ser muito inferior à do betão denso e do tijolo de alvenaria.

As barreiras de materiais metálicos e de madeira tiveram resultados de perda de transmissibilidade menos expressivos, considerando-se que características como menor densidade e menor porosidade sejam os fatores causadores desta variação.

No entanto, considera-se que será necessário um estudo mais aprofundado e ensaios diferentes para se poder concluir sobre esta variação.

Geralmente barreiras com maior perda de transmissibilidade têm como consequências o fenómeno de reflexão de ondas no interior da via, resultante da alta densidade dos painéis. As soluções para este problema consistem na utilização de painéis inclinados ou em consola, painéis com padrões superficiais e textura irregular ou colocação de elementos absorventes entre a fonte e o painel, tais como fileiras de vegetação ou aplicação de uma cobertura de material absorvente na superfície do painel.

Uma solução interessante é a possibilidade de criar barreiras sem recorrer a materiais pré-fabricados, utilizando materiais naturais oriundos dos trabalhos de terraplenagem, contudo esta solução requer a existência de algum espaço físico livre lateral à via.

A decisão de utilização de camadas de desgaste de baixo ruído ou de barreiras acústicas com o objetivo de mitigação de ruído rodoviário é uma escolha que deve ser

ponderada tendo em conta as características do local e dos recetores na envolvente, tendo presente que são sistemas que não podem ser equiparados pois têm um modo de atuação diferente.

As camadas de desgaste de baixo ruído atuam na fonte, diminuindo o ruído que é gerado pela ligação pneu-pavimento, as barreiras atuam no caminho entre a fonte e o recetor, como proteção e atenuador de ruído, considerando-se que não pode ser elaborada uma comparação direta entre estes elementos.

Conclui-se, assim que a utilização dos dois tipos sistemas em simultâneo é uma boa metodologia para garantir a mitigação de ruído que possa perturbar a envolvente, pelo facto de estes dois sistemas serem complementares. O diferente tipo de atuação, a redução do ruído gerado na fonte e o isolamento do recetor, aumentam a performance do sistema de atenuação sonora.

Considera-se que não é possível mitigar na totalidade o ruído rodoviário produzido, é necessária a continuação do desenvolvimento de tecnologia dos diferentes tipos de sistemas.

O aumento do fluxo de tráfego, consequência do crescimento das cidades, e a necessidade de harmonizar a aparência estética dos elementos pré-fabricados com a envolvente são os maiores desafios no constante desenvolvimento de soluções. Estes devem continuar a ser enfrentados com o objetivo de reduzir do ruído sentido nas envolventes de infraestruturas rodoviárias, de modo a evitar as consequências provocadas ao ser humano, à natureza e às próprias infraestruturas.

Após as considerações finais sobre as análises aos dados de ensaios admite-se que seria interessante aprofundar o conhecimento sobre o impacto da velocidade e das condições de aderência, tendo como objeto de estudo outros tipos de misturas betuminosas, de modo a avaliar os efeitos causados por estas alterações mediante diferentes características volumétricas e materiais.

No que se refere às barreiras acústicas, seria enriquecedor analisar o conceito de barreiras com sistemas de reaproveitamento da energia acústica, isto é, barreiras constituídas por painéis equipados com sistemas que transformassem a energia acústica do ruído em energia elétrica.

Revisão Bibliográfica

Abbott, P., Andersen, B., Anfosso-Ledee, F., Bartolomaeus, W., Bendtsen, H., van Blokland, G., Descornet, G., Ejibersen, M., Ejsmont, J., Habert, J., Hamet, J., Mioduszewski, P., Nilsson, R., Padmos, C., Pucher, E., Roovers, C., Sandberg, U., Sliwa, N., Veisten, K., ... Watts, G. (2006). *Guidance Manual for the Implementation of Low-Noise Road Surfaces*.

Agência Portuguesa do Ambiente. (2023). <https://apambiente.pt>

Alfredson, R. J., & Du, X. (1995). *Special shapes and treatment for noise barriers*.

Antunes, S., & Patrício, J. V. (2008). *Avaliação da eficácia das medidas de minimização de impactes ambientais implementadas em Portugal*.

Azevedo, M. da C. (INIR). (n.d.). *Construção e reabilitação de pavimentos indicadores de estado de conservação dos pavimentos*.

Bendtsen, H. (2007). *State-of-the-art of low-noise pavements*.

Bistafa, S. R. (2011). *Acústica aplicada ao controle de ruído*.

Bollard, K. (1999). *Report on the Status of Rubberized Asphalt Traffic Noise Reduction in Sacramento County* (Issue November).

Branco, F., Pereira, P., & Picado Santos, L. (2020). *Pavimentos Rodoviários*. Almedina.

Brüel & Kjaer. (2023). www.bksv.com/pt/knowledge/blog/sound/wavelength%0Ato-frequency

Carmo Wood. (2024). <https://www.carmo.com/>

CEPSA. (2007). *Cap. 5 - Misturas betuminosas a quente* (p. 33). <http://www.sanestradas.pt/pt/pagina/18>

Construction Connect Canada. (2023). canada.constructconnect.com

Costa, R. G., Fernandes, A. de P. L., Lima, B. R., Gonçalves, C. M. M., de Paula, E. mendes, Gonçalves, G. A. dos S., Alves, Í. C., & de Oliveira, R. K. F. G. (2023). *Acústica para engenheiros*.

da Silva Santos, A. P. (2007a). *Estudo da eficácia na redução do ruído de tráfego em pavimentos drenantes*.

da Silva Santos, A. P. (2007b). *Estudo da Eficácia na Redução do Ruído de Tráfego*

em Pavimentos Drenantes.

Decreto-Lei n.º 9/2007 - Regulamento Geral do Ruído, (2007).

Decreto-Lei n.º 151-B/2013, (2013).

Decreto-Lei n.º 84-A/2022 - Regime de Avaliação e Gestão do Ruído Ambiente, (2022).

Ecopore advanced solutions. (2024). www.ecopore.com.br

Enteknorate.com. (2023). enteknorate.com

Farcimar. (2019). Soluções em pré-fabricados de betão.

FHWA. (2018). The Use of Thin Asphalt Overlays for Pavement Preservation.

fq.pt. (2023). www.fq.pt

Freitas, E. (2010). Contribution of Asphalt Rubber Mixtures to Noise Abatement - Time Effect.

Freitas, E. (2013). Definição e características de superfícies de baixo ruído.

Freitas, E., Mendonça, C., Santos, J. A., Murteira, C., & Ferreira, J. P. (2012). Traffic noise abatement : How different pavements , vehicle speeds and traffic densities affect annoyance levels (Vol. 17, Issue 4). Elsevier Ltd.

<https://doi.org/10.1016/j.trd.2012.02.001>

Freitas, E., Oliveira, J., Machado, P., & Pereira, S. (2012). Innovative low noise road pavement materials studied in Portugal.

Freitas, E., Paulo, J., & Coelho, J. B. (2008). Avaliação do desempenho acústico de pavimentos rodoviários.

Freitas, E., Pereira, P. A. A., Santos, L. G. P., & da Silva Santos, A. P. (2009). Traffic Noise Changes Due to Water on Porous and Dense Asphalt Surfaces.

Fujiwara, K., & Furuta, N. (1991). Sound shielding efficiency of a barrier with a cylinder at the edge.

Fujiwara, K., & Ishiduka, T. (1999). Noise shielding efficiency of barrier with multiple absorbing edge obstacle.

Guedes, M., Leite, M. J., & Sequeira, N. (2008). Directrizes para Elaboração de Mapas de Ruído (Agência Portuguesa do Ambiente).

Guidelines on Design of Noise Barriers (Issue December). (2022).

Hendriks, R., Rymer, B., Buehler, D., & Andrews, J. (2013). Technical Noise

Supplement to the Caltrans Traffic Noise Analysis Protocol-A Guide for the Measuring, Modeling, and Abating Highway Operation and Construction Noise Impacts.

I. S. Duarte, D. (2015). *O Desempenho Acústico dos Edifícios e os Pormenores Construtivos.*

INAD Brasil. (2021). <https://www.inadbrasil.com/>

Isoltop. (2024). www.isoltop.com

ISTIQ Noise Control. (2024). www.istiq.com.my

Knapton, J. (1996). *The romans and their roads - The original small element pavement technologists.* University of Newcastle.

Knauer, H., Pedersen, S., Lee, C., & Fleming, G. (2000). *FHWA Hightway noise barrier design handbook 2000.*

Kotzen, B., & English, C. (2009). *Environmental noise barriers: a guide to their acoustic and visual design* (2 nd).

Kragh, J., Nielsen, E., Goubert, L., Vansteenkiste, S., De Visscher, J., Sandberg, U., & Karlsson, K. (2011). *Optimization of Thin Asphalt Layers* (Issue March).

Lee, S., Yung, Y., Ho, T., & Le, M. (2023). Case Studies in Construction Materials Evaluation of low-noise-drainage pavements with varied aggregate sizes : A case study in South Korea [Elsevier Ltd]. In *Case Studies in Construction Materials* (Issue August). <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02486>

Lei n.º 19/2014, (2014).

Martens, M. J. M. (1980). *Foliage as a low pass filter: experiments with model forests in an anechoic chamber.*

Matis Insonorizzazioni. (2024). www.matisinsonorizzazioni.com

Matos, J., Fradique, J., Tavares, L., Guedes, M., & Leite, M. J. (2020). *Guia prático para medições de ruído ambiente.* Agência Portuguesa do Ambiente.

Mendes, B., & Silva, L. T. (2002). *Impacto do ruído na saúde e qualidade de vida das pessoas: O caso da cidade de Guimarães.*

Miranda, H. M. B. (2023). *Pavimentos Betuminosos.*

NI.com. (2023).

<https://knowledge.ni.com/KnowledgeArticleDetails?id=kA00Z0000019N3eSAE&l=pt-PT>

NP ISO 1996-1, (2019).

Okubo, T., & Fujiwara, K. (1998). *Efficiency of a noise barrier with an acoustically soft cylindrical edge* (Vol. 3).

Oliveira, A. I. F. (2016). *Avaliação do impacto das degradações no ruído pneu-pavimento*. Universidade do Minho.

Oliveira de Carvalho, A. P. (2008). *Acústica ambiental e de edifícios*.

Padua, A. D. E., Fernandes, L., Lima, B. R., Maria, C., Goncalves, M., Paula, E. M. D. E., & Goncalves, F. (2023). *Acústica para engenheiros*. Editora Científica.

Pasquet, A. (1968). *Colloque international sur la glissance et la circulation sur routes mouillées*.

PavementInteractive.org. (2023). pavementinteractive.org

Pereira, A. H. P. (2010). *Caracterização acústica de pavimentos rodoviários e influência na emissão sonora*. FEUP.

Pereira, P., Freitas, E., & Anfosso-Lédée, F. (2006). *Assessment of the performance of asphalt rubber layers on noise abatement*.

Pilebyg. (2024). <https://pilebyg.dk/>

Portal Acústica. (2019). www.portalacustica.info

Portaria n.º 395/2015, (2015).

Ranazzi, P. P. de C. (2016). *Estudo de Misturas Betuminosas do Tipo CPA para Revestimento de Pavimentos Aeroportuários*. ISEP.

Ray Chung acrylic enterprise. (2024). www.raychung-acrylic.com

Ribeiro Gonçalves, R. P. (2014). *Atenuação Sonora de Barreiras Acústicas*.

Rodrigues, A. J. (2013). *Barreiras Acústicas, uma solução para controlar o ruído em meio urbano*.

Russel. (2015). *Hush Acoustics*. www.hushacoustics.co.uk

Sandberg, U., & Ejsmont, J. (2002). *Tyre/Road Noise Reference Book*.

SN. (2018). *Rieder: Another million-euro contract for noise protection on the A10*. www.sn.at

Svantek.com. (2024). <https://svantek.com/pt/academia/nivel-sonoro-continuo-equivalente-leq/>

Wagman Construction. (2024). www.wagman.com

Watson, D. (2006). *Evaluation of benefits and opportunities for innovative noise barrier designs*.

Wayson, R. (Transportation R. B. (1998). *NCHRP - Synthesis of Highway Practice 268 - Relationship Between Pavement Surface Texture and Highway Traffic Noise*.

Yamamoto, K., Shono, Y., Ochiano, H., & Hirao, Y. (1995). *Measurements of noise reduction by absorptive devices mounted at the top of highway noise barriers*.

Yanagiya, T., & Abiko, A. (2021). *Métodos para redução do ruído urbano*. Universidade de São Paulo.