



UTILIZAÇÃO DE MATERIAIS ANTI-VIBRÁTEIS E DE ISOLAMENTO ACÚSTICO NA VIA FÉRREA

**BRUNA HELENA DE SOUSA E ANDRADE PINHEIRO DE
MACEDO**

Licenciada em Engenharia Civil

Trabalho Final de Mestrado para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil na
Área de Especialização de Vias de Comunicação e Transportes

Orientadores:

Licenciado, Eng.º Armando Martins, Prof. Adjunto (ISEL)

Licenciada, Eng.ª Luísa Ferreira Cardoso Teles Fortes, Prof. Adjunto (ISEL)

Mestre Paulo Jorge dos Santos Almeida Pinto, Diretor CDM Portugal (CDM)

Júri:

Presidente: Doutor João Alfredo Ferreira dos Santos, Prof. Coordenador (ISEL)

Vogais:

Licenciado, Francisco Manuel de Oliveira Sécio, Presidente da CT143

Licenciada, Eng.ª Luísa Ferreira Cardoso Teles Fortes, Prof. Adjunto (ISEL)

Licenciado, Eng.º Armando Martins, Prof. Adjunto (ISEL)

Mestre Paulo Jorge dos Santos Almeida Pinto, Diretor CDM Portugal (CDM)



À minha família e amigos.

«Querer é Poder»

Instituto dos Pupilos do Exército



RESUMO

O ruído e a vibração gerados pelo tráfego ferroviário são o resultado de um processo complexo, originado principalmente pela interação roda-carril. Este processo representa uma das fontes mais importante de contaminação acústica das áreas urbanas, quer pela emissão de ruído aéreo quer pelas vibrações transmitidas às estruturas vizinhas.

O aumento das redes de transportes urbanos e a construção de edifícios na proximidade das vias (devido à forte pressão urbanística dos últimos anos), em paralelo com uma legislação mais exigente e uma maior sensibilização por parte dos especialistas e da população em geral no que respeita ao conforto acústico, leva a que seja cada vez maior a necessidade de adoção de medidas de minimização do ruído e vibrações nas infraestruturas ferroviárias.

Para além da diversidade de soluções no âmbito do isolamento passivo, a introdução de elementos resilientes na infraestrutura de uma Via Férrea, como forma de intervir ativamente no isolamento das vibrações, tem sido uma das medidas mais adotadas ao longo dos últimos anos.

Os materiais anti-vibráteis e de isolamento acústico, surgem assim com a pretensão de minimizar ou mesmo eliminar estas carências.

A correta seleção e ajustamento às condições de operação, à tipologia da via e às exigências acústicas, são fatores imprescindíveis para se obter um correto desempenho, minimização dos custos ao longo do seu ciclo de vida, garantindo assim uma solução sustentável para a Via Férrea.

As matérias-primas utilizadas no fabrico dos materiais anti-vibráteis têm geralmente uma componente que deriva de materiais reciclados, aproveitando assim não só as suas características (mecânicas e funcionais), mas também possibilitando a resolução de um problema de natureza ambiental (armazenamento ou eliminação resíduos), aspeto que hoje em dia assume cada vez mais importância.

Com o presente estudo, para além de uma breve caracterização da via férrea, pretende-se analisar a viabilidade e os efeitos práticos da utilização destes materiais, numa ótica de eliminar (ou no mínimo reduzir) os desconfortos causados pela exploração de vias férreas em especial em zonas próximas de aglomerados populacionais, ou de equipamentos especiais como sejam hospitais.

Palavras-chave: Caminhos-de-ferro, Via Férrea, Vibração, Ruído.



ABSTRACT

The noise and vibration generated by the rail are the result of a complex process originated mainly by wheel-rail interaction. This process represents one of the most important sources of noise pollution in urban areas, either by air or noise emissions and vibration transmitted to the neighboring structures.

The increase in urban transport networks and the construction of buildings in the vicinity of roads (due to heavy pressure real estate in recent years), in parallel with a more stringent legislation and increased awareness on the part of experts and the general public with regard to acoustic comfort, which is leading to a growing need to adopt measures to minimize noise and vibration in railway infrastructure.

Apart from the different solutions within the passive isolation, the introduction of resilient elements in the infrastructure of a rail track, in order to intervene actively on the vibration isolation has been one of the most adopted over the past years.

The materials and anti-vibrating sound insulation, come with the intention to minimize or even eliminate these shortcomings.

The correct selection and tuning the operating conditions, the typology via acoustic and requirements are essential factors to obtain the proper performance of the track, minimizing costs throughout its life cycle and ensure a sustainable solution for route rail.

The raw materials used in the manufacture of anti-vibrating material generally have a component which is derived from recycled materials, taking advantage of not only characteristics (mechanical and functional), but also enables solving a problem of environmental (waste storage or disposal), aspect which nowadays is increasingly important.

With this study, apart from a brief characterization of the track, it is intended to analyze the feasibility and the practical effects of using these materials in optics to eliminate (or at least reduce) the discomforts caused by the operation of railways in particular in areas near settlements, or special equipment such as hospitals.

Keywords: Railways, Track, Noise, Vibrations



AGRADECIMENTOS

O presente trabalho é nada mais que o colmatar do meu ciclo académico.

Em primeiro lugar quero agradecer aos meus orientadores, mais concretamente ao Eng.^o Armando Martins por todo o apoio prestado, credibilidade e confiança na minha pessoa. Queria ainda acrescentar um agradecimento ao Eng.^o Paulo Pinto da CDM, por toda a informação disponibilizada.

Desta forma quero agradecer à minha família, em particular ao meu irmão por ser a minha referência e me fazer crescer muitas vezes, à minha mãe por me ter formado e educado de uma forma acertada e ao meu pai pelas diversas vezes que me contrariou, suscitando desta forma o meu interesse em provar-lhe o contrário. Quero ainda deixar o meu tributo à minha avó Maria Helena de Sousa e Andrade, não se encontrando esta entre nós, tenho a certeza que ficaria extremamente orgulhosa da sua neta.

Quero agradecer a três grupos particulares de amigos, aos amigos de sempre, aos amigos académicos e aos amigos “voleibolísticos”. Aos amigos de sempre, agradeço a sua lealdade pela nossa amizade, tendo em conta todas as minhas ausências e a minha escassez de tempo para disfrutar da vossa companhia.

Quanto aos académicos agradeço toda a paciência e lealdade em momentos de tensão. Por fim a todos os meus amigos “voleibolísticos”, por todas as viagens que fizemos nas quais foram meus fiéis companheiros de estudo e a todos os momentos de descontração que me proporcionaram.



ÍNDICE

RESUMO	I
ABSTRACT	II
AGRADECIMENTOS	V
ÍNDICE.....	IV
ÍNDICE DE FIGURAS	VI
ÍNDICE DE QUADROS	IX
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS	X
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 ENQUADRAMENTO DO TEMA	1
1.2 OBJETIVO	2
1.3 ESTRUTURA.....	2
2. HISTÓRIA DO TRANSPORTE FERROVIÁRIO.....	5
2.1 O INÍCIO	5
2.2 IMPACTO NO PERCURSO DA HISTÓRIA MUNDIAL.....	6
2.3 EM PORTUGAL.....	7
2.4 OS CAMINHOS-DE-FERRO SUBTERRÂNEOS (METROPOLITANO)	7
3. A VIA FÉRREA	11
3.1 TIPOS DE VIA.....	12
3.2 VIA EXPOSTA	13
3.2.1 <i>Superestrutura</i>	13
3.2.2 <i>Infraestrutura</i>	24
3.3 VIA EMBEBIDA	26
4. RUÍDO E VIBRAÇÃO	27
4.1 O RUÍDO	27
4.1.1 <i>Ponderação da pressão sonora face a várias fontes</i>	31
4.1.2 <i>Propagação do ruído</i>	32
4.1.3 <i>Medição do ruído</i>	34
4.1.4 <i>Organização espacial dos elementos por forma a minimizar o ruído</i>	35
4.2 DIFERENTES TIPOS DE RUÍDO ASSOCIADOS À VIA FÉRREA	35
4.2.1 <i>Ruído de rolamento</i>	37
4.2.2 <i>Ruído de tração</i>	38
4.2.3 <i>Ruído aerodinâmico</i>	38
4.2.4 <i>Ruído dos equipamentos auxiliares</i>	38
4.2.5 <i>Ruído do pantógrafo</i>	38
4.2.6 <i>Ruído estrutural</i>	39



4.3	A VIBRAÇÃO	41
4.3.1	<i>Geração de vibrações</i>	43
4.3.2	<i>Propagação</i>	44
5.	ENQUADRAMENTO LEGAL	47
5.1	DOCUMENTOS LEGAIS	47
5.2	METODOLOGIA PARA A QUANTIFICAÇÃO DO INDICADOR DE RUÍDO	48
5.2.1	<i>Períodos horários</i>	49
5.2.2	<i>Caraterização das zonas em estudo</i>	49
5.3	REGRAS PARA A REALIZAÇÃO DAS MEDIÇÕES ACÚSTICAS	50
5.4	MAPAS DE RUÍDO E PLANOS DE REDUÇÃO DE RUÍDO.....	50
5.5	VALORES LIMITE DE EXPOSIÇÃO	51
5.6	HIERARQUIZAÇÃO DAS MEDIDAS MITIGADORAS	52
5.7	VALOR LIMITE PARA ZONAS SENSÍVEIS EXPOSTAS AO RUÍDO DE UMA GRANDE INFRAESTRUTURA RODOVIÁRIA	53
5.8	VIBRAÇÃO - CRITÉRIOS DE ADMISSIBILIDADE	53
6.	MEDIDAS MITIGADORAS PARA O RUÍDO E VIBRAÇÃO	55
6.1	VIAS EXPOSTAS	55
6.1.1	<i>Nível de intervenção 1</i>	55
6.1.2	<i>Nível de intervenção 2</i>	56
6.1.3	<i>Nível de intervenção 3</i>	59
6.2	VIA EMBEBIDA	62
6.3	OUTRAS MEDIDAS	64
6.3.1	<i>Ações ao nível da roda</i>	64
6.3.2	<i>Ações ao nível do carril</i>	67
6.3.3	<i>Ações no âmbito da Alta Velocidade</i>	67
6.3.4	<i>Ações para diminuição de picos de ruído (“squeal noise”)</i>	68
6.4	CONSTITUIÇÃO DOS MATERIAIS USADOS.....	69
7.	CASOS EM ESTUDO	71
7.1	VIADUTO DE QUELUZ BELAS	71
7.2	VIADUTO DA CAPARICA	74
7.3	ESTAÇÃO DE BENFICA.....	76
7.4	LINHA DE SINTRA, ENTRE O PK’S 13+750 E 18+250.....	79
7.5	METROPOLITANO DE LISBOA - PROLONGAMENTO DA LINHA VERMELHA, TROÇO ALAMEDA – CAMPOLIDE	81
7.6	REFLEXÕES SOBRE OS CASOS DE ESTUDO	85
8.	CONCLUSÕES	87
9.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	91



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Evolução da velocidade nos transportes terrestres [38]	5
Figura 2.2 – Locomotivas: a vapor, diesel e elétrica [10]	6
Figura 2.3 – TGV: Velocidade Máxima de 574.8 Km/h [21].....	6
Figura 2.4 – Inauguração do troço Lisboa - Carregado [10]	7
Figura 2.5 – Rede do Metropolitano de Lisboa em 1959 [24]	8
Figura 2.6 – Rede do Metropolitano de Lisboa em 1998 [24]	8
Figura 2.7 – Rede do Metropolitano de Lisboa em 2012 [24]	9
Figura 2.8 - Rede do Metropolitano de Londres 2012 [37]	9
Figura 3.1 – Infraestrutura e Superestrutura [30]	11
Figura 3.2 – Tipos de Via.....	12
Figura 3.3 – Estrados pré-fabricados em Passagem de Nível (Via balastrada / embebida) [33]	12
Figura 3.4 – Partes constituintes do carril [11] versão editada	14
Figura 3.5 - Soldadura aluminotérmica [22]	14
Figura 3.6 - Bitola Ibérica e Europeia.....	15
Figura 3.7 – Travessas de madeira (fonte: [11])	16
Figura 3.8 – Travessas bi-bloco de betão [22]	17
Figura 3.9 – Travessas monobloco de betão [22].....	17
Figura 3.10 – Esquema de fixação da travessa monobloco polivalente [11].....	18
Figura 3.11 – Travessa monobloco de betão para 3 carris [11].....	18
Figura 3.12 - Travessas metálicas [22].....	19
Figura 3.13 - Juntas de ligação. Modo de ligação do sistema barreta, parafuso, porca e anilha [11].....	20
Figura 3.14 – Fixação rígida [11].....	21
Figura 3.15 – Fixação elástica [11].....	21
Figura 3.16 – Via assente em balastro [22]	22
Figura 3.17 - Via assente em laje de betão [22]	22
Figura 3.18 – Construção de via embebida [25]	26
Figura 3.19 – Colocação do carril em via embebida [15]	26
Figura 4.1 – Escala de Ruído [3].....	27
Figura 4.2 – População (%) afetada pelo ruído ferroviário na Europa [14]	28
Figura 4.3 - Espectro de frequências associadas ao ruído [4]	30
Figura 4.4 - Curva de ponderação [4]	31
Figura 4.5 – Gráfico de adição de níveis de pressão sonora [4]	32
Figura 4.6 – Metodologia de propagação do ruído [4]	32
Figura 4.7 – Fonte de ruído pontual com esquema de atenuação [4]	33



Figura 4.8 - Fonte de ruído linear com esquema de atenuação [4]	34
Figura 4.9 – Indicadores fornecidos pelo sonómetro [4]	34
Figura 4.10 – Exemplo de minimização do ruído nas zonas sensíveis de um prédio habitacional [4]	35
Figura 4.11 – Fontes de ruído de acordo com a velocidade da composição [14]	36
Figura 4.12 – Desenvolvimento da geração de ruído durante a passagem de uma composição [14]	37
Figura 4.13 – Ruído de rolamento [18].....	37
Figura 4.14 – Comboio com tração elétrica [22]	39
Figura 4.15 – Propagação do Ruído Estrutural [2].....	40
Figura 4.16 – Barreiras acústicas [29].....	40
Figura 4.17 – Caracterização do movimento harmónico simples [34]	42
Figura 4.18 – Propagação das Vibrações [27].....	43
Figura 4.19 – Comprimentos de onda associados aos fenómenos de geração de vibração [27]	44
Figura 4.20 – Deformação do meio face a ondas volumétricas (P e S) [27]	45
Figura 4.21 - Deformação do meio face a ondas superficiais (L e R) [27].....	46
Figura 5.1 – Períodos horários.....	49
Figura 5.2 – Hierarquização das medidas de ação	52
Figura 6.1 – Localização do 1º nível de intervenção [6]	55
Figura 6.2 – Palmilhas de carril, aplicação na via balastrada ou betonada [6].....	56
Figura 6.3 – Tira para carril, aplicação na via assente em laje [6]	56
Figura 6.4 - Localização do 2º nível de intervenção em vias balastradas [6]	57
Figura 6.5 – 2º Nível de intervenção em vias balastradas [6])	57
Figura 6.6 – Palmilha na base da fixação [6]	58
Figura 6.7 – Material de fixação com palmilha incorporada [6].....	58
Figura 6.8 – Travessas com material elastómero [15].....	59
Figura 6.9 - Localização do 3º nível de intervenção [6].....	59
Figura 6.10 – Colocação de uma manta de balastro em via balastrada [6].....	60
Figura 6.11 – Pormenor da disposição das camadas após aplicação da camada absorvente em via balastrada [6]	60
Figura 6.12 – Colocação de uma manta de borracha contínua em via assente em laje [6]	60
Figura 6.13 - Colocação de uma manta de borracha descontínua em via assente em laje [6]	61
Figura 6.14 – Colocação de uma camada de placas com apoios discretos [6]	61
Figura 6.15 – Intervenção em vias embebidas [6].....	62
Figura 6.16 - Via Férrea embebida silenciosa [6].....	62
Figura 6.17 – Via Férrea embebida flexível [6]	63
Figura 6.18 – Via férrea embebida apoiada continuamente [15]	63
Figura 6.19 – Travões de Calços e de Disco [14].....	64



Figura 6.20 – Roda com anéis amortecedores e furações [14]	65
Figura 6.21 – Roda com anéis absorventes [14].....	65
Figura 6.22 – Roda com o escudo protetor integrado [14]	66
Figura 6.23 – Roda projetada pela Rona, Alu4 [35].....	66
Figura 6.24 – “Rail dampers” da empresa Tata steel [14]	67
Figura 6.25 – Exemplo de revestimento do pantógrafo (Japanese Shinkasen Series 700)	68
Figura 7.1 – Localização do Viaduto do Jamor [19]	72
Figura 7.2 – Viaduto Queluz-Belas - Seção Transversal Tipo [26].....	72
Figura 7.3 – Simulação da radiação sonora da estrutura do viaduto, à cota absoluta de 118 m (Via não Tratada) [8]	73
Figura 7.4 - Simulação da radiação sonora da estrutura do viaduto, à cota relativa de 4 m do solo (Via não Tratada) [8]	73
Figura 7.5 - Simulação da radiação sonora da estrutura do viaduto, à cota absoluta de 118 m (Via Tratada) [8]	74
Figura 7.6 - Simulação da radiação sonora da estrutura do viaduto, à cota relativa de 4 m do solo (Via Tratada) [8]	74
Figura 7.7 - Localização do Viaduto da Caparica [19]	75
Figura 7.8 – Localização da Estação de Benfica [19]	76
Figura 7.9 – Interior da Estação de Benfica [26].....	77
Figura 7.10 – Nível de ruído na estação de Benfica.....	77
Figura 7.11 - Localização da Estação de Agualva-Cacém [19]	79
Figura 7.12 – Barreiras acústicas [22]	80
Figura 7.13 - “Passagem inferior dos Missionários” [19].....	81
Figura 7.14 - Localização do troço Alameda-São Sebastião [19]	81
Figura 7.15 - Esquema de aplicação das soluções 1 e 2 [16].....	83
Figura 7.16 – Esquema de aplicação da 3ª solução [16].....	84
Figura 7.17 – Pormenor do esquema de aplicação da 3ª solução [16]	84
Figura 7.18 - Pormenor de aplicação da 4ª e 5ª solução [16]	85



ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 3.1 - Vantagens e desvantagens associadas às travessas de betão	16
Quadro 3.2 - Vantagens e desvantagens associadas às travessas de betão	18
Quadro 3.3 - Vantagens e desvantagens associadas às travessas metálicas	19
Quadro 3.4 – Classes de Plataformas [27].....	24
Quadro 3.5 – Qualidade dos solos [27]	25
Quadro 4.1 - Sumarização do nº de pessoas afetadas pelo ruído “poluente” [14].....	28
Quadro 4.2 – Principais alterações na saúde humana devido à exposição excessiva de ruído [14]	29
Quadro 4.3 - Critérios para o cálculo da pressão sonora final de um conjunto de fontes sonoras	31
Quadro 4.4 – Importância das fontes de geração de ruído [14]	36
Quadro 4.5 – Preços por metro para a colocação de barreiras acústicas [14].....	40
Quadro 4.6 – Fatores importantes para a geração de vibrações [27]	44
Quadro 5.1 - Caracterização dos diferentes tipos de zona de análise face à exposição ao ruído	49
Quadro 5.2 – Requisitos Mínimos para os Mapas de Ruído.....	51
Quadro 5.3 – Requisitos Mínimos para os Planos de Redução de Ruído	51
Quadro 5.4 – Valores Limite de Exposição ao Ruído	52
Quadro 5.5 – Valores Limite para Zonas Sensíveis expostas ao ruído de uma grande infraestrutura	53
Quadro 5.6 -Valores limite de velocidade de vibração para a incomodidade percebida por pessoas [32]	53
Quadro 5.7 – Valores Limite de Velocidade de Vibração para danos em estruturas [32].....	54
Quadro 5.8 – Valores Corretivos de V_{ef} [32]	54



LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AMV – Aparelho de Mudança de Via

APA – Agência Portuguesa do Ambiente

BLS – Barra Longa Soldada

CCFL – Companhia Carris de Ferro de Lisboa

dB - Decibel

E.U.A – Estados Unidos da América

IST – Instituto Superior Técnico

L_d – Indicador de ruído diurno

L_e – Indicador de ruído entardecer

L_{den} – Indicador de ruído diurno-entardecer-noturno

$L_{eq_{passagem}}$ – Indicador de ruído de passagem

L_n – Indicador de ruído noturno

PDM – Plano Diretor Municipal

PU – Plano de Urbanização

REFER – Rede Ferroviária Nacional

RGR – Regulamento Geral de Ruído

UE – União Europeia

UIC – International Union of Railways

V_{ef} – Velocidade Efetiva da Vibração



1. INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento do tema

Com o que vulgarmente, nos denominados “Países Desenvolvidos” se designa por “Progresso”, muitos dos conceitos e formas de estar foram sendo alterados e/ou abandonados, levando a que os seus habitantes tenham cada vez menos tempo livre, necessitem de deslocações mais rápidas, sejam maiores consumidores, enfim,..., tudo isto em busca da “dita” felicidade e bem-estar.

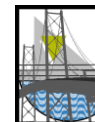
No entanto, como em tudo na vida, também existe uma tendência para recuperar coisas boas do passado e nesse sentido são notórias as pesquisas e posterior implementação de soluções que permitam eliminar, ou não sendo possível, atenuar alguns desses efeitos indesejados, como seja o ruído e as vibrações, designadamente as que têm origem nos transportes.

As causas para o surgimento/elevação para estes tipos de incómodos (nomeadamente o ruído não natural¹) são várias, destacando-se as seguintes:

- Alteração do estilo de vida campestre para um estilo citadino;
- Aumento da densidade populacional nas zonas urbanas;
- Necessidades de deslocação (pessoas e bens), a maiores distâncias, mais rapidamente e em maior volume;
- Industrialização.

Em resultado, surgem “nuvens de poluição sonora” para as quais é necessário encontrar soluções, por forma a garantir uma situação de equilíbrio, permitindo assim a continuidade na utilização das acessibilidades a que a sociedade está habituada e de que dificilmente prescindirá.

¹ Ruído provocado por causas naturais: Vento, trovoada, cursos de água,...



1.2 Objetivo

O presente documento pretende assim contribuir para uma maior clarificação na utilização de materiais anti-vibráteis, aplicados à Via Férrea, tendo em vista a redução, ou mesmo eliminação das referidas “nuvens” e permitir uma coexistência entre o transporte ferroviário (com todas as exigências que atualmente lhe estão atribuídas) e a melhoria (em termos ambientais) da qualidade de vida das populações afetadas.

1.3 Estrutura

O presente documento está estruturado conforme indicado em seguida.

- Capítulo 1: Apresentam-se as linhas gerais do estudo, enquadrando o mesmo à nossa realidade, identificando os objetivos e a sua estrutura global;
- Capítulo 2: Contextualização histórica da evolução dos caminhos-de-ferro, (incluindo nos períodos relativos às guerras mundiais de 1914-1918 e 1939-1945);
- Capítulo 3: Sensibilização sobre os conceitos básicos relacionados com a constituição das vias férreas, permitindo assim, de forma mais fácil a compreensão das soluções utilizadas para atenuação do ruído e vibrações;
- Capítulo 4: Como “para obter o antídoto é necessário perceber o vírus”, neste capítulo procede-se ao enquadramento do ruído e a vibração fora do contexto ferroviário, transmitindo a forma como os mesmos se comportam.

Neste sentido, explicita-se o conceito de ruído, formas de medição, incomodidades e controlo.

Ainda neste capítulo são referidos conceitos intrinsecamente ligados com a Via Férrea, definindo e explicitando os diversos tipos de ruído associados à mesma;

- Capítulo 5: Abordagem do Enquadramento Legal, aspeto de elevada importância, sendo salientados os documentos passíveis de análise para a introdução de qualquer elemento estrutural numa zona sujeita a ruído, ou mesmo as disposições a ter em conta quando da introdução de uma nova fonte de ruído;



- Capítulo 6: Apresentação de soluções disponíveis no mercado para a mitigação do ruído e vibrações, bem como as metodologias de aplicação, vantagens e desvantagens. É ainda efetuada uma abordagem relativamente à composição dos materiais usados;
- Capítulo 7: Apresentação de vários casos de estudo, em que foram aplicadas soluções identificadas no capítulo 6, explanando a situação inicial, soluções adotadas e o resultado final;
- Capítulo 8: Conclusões, incluindo a apreciação da viabilidade e eficácia dos materiais em estudo.



2. HISTÓRIA DO TRANSPORTE FERROVIÁRIO

2.1 O início

Nos dias de hoje, salvo situações específicas, como por exemplo em zonas de estações/terminais, torna-se praticamente impensável associar o transporte ferroviário à prática de velocidades baixas. No entanto, na época dos primeiros tempos do caminho de ferro, as velocidades praticadas eram similares à velocidade de deslocação de um peão em idade adolescente, na ordem dos 6 km/h.

A evolução tecnológica do material de tração (locomotivas), em associação com a sua estrutura de guiamento (via férrea), tem permitido um aumento gradual das velocidades praticadas. Para além disso, tem igualmente sido uma constante o aumento do conforto para os passageiros.

Em 1825 foi construída a primeira linha férrea, que compreendia um troço com 61 km, entre Stockton e a região mineira de Darling. A locomotiva, de nome Blucher, era um poderoso auxílio para o transporte dos materiais extraídos das minas. A velocidade nesta fase inicial rondava os anteriormente referidos 6 km/h.

No ano de 1829, com outro tipo de locomotiva, já foi possível atingir velocidades na ordem dos 30 km/h. Mais tarde e no espaço de uma década, já eram praticadas velocidades na ordem dos 100 km/h.

Na Figura 2.1, embora não seja exclusiva do transporte ferroviário e não contemple os dias de hoje, é possível observar a evolução das velocidades do modo ferroviário.

Fonte: [10]

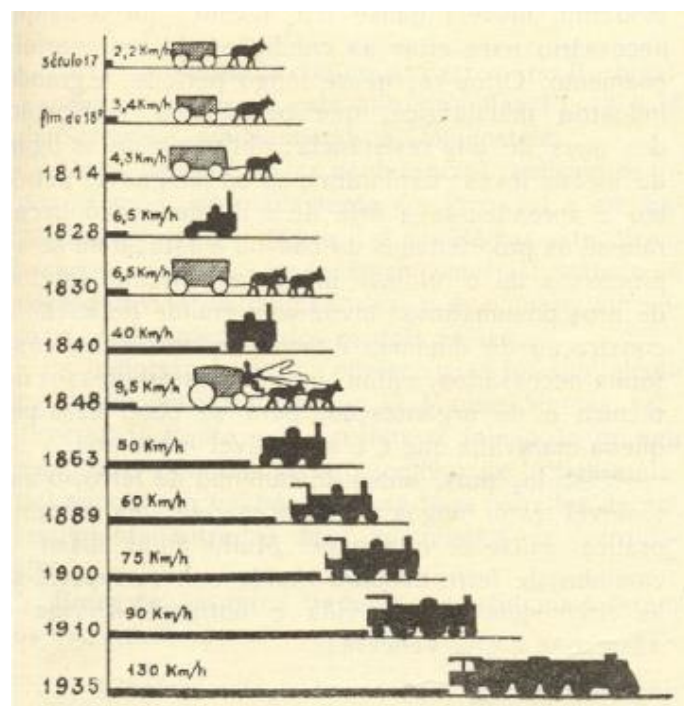
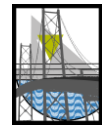


Figura 2.1 – Evolução da velocidade nos transportes terrestres [38]



2.2 Impacto no percurso da história mundial

Os caminhos-de-ferro contribuíram de forma crucial para o percurso de toda a história mundial após o séc. XIX. Auxiliaram a colonização da América, contribuindo de forma negativa para o desaparecimento de algumas tribos (as mesmas designavam o comboio como o “cavalo de ferro”).

Durante as duas grandes guerras, a primeira entre 1914 e 1918 e a segunda entre 1939 e 1945, foi um dos meios de transporte largamente utilizado, apesar de alguns países possuírem bitola² de tamanho diferente para evitar que as suas fronteiras fossem ultrapassadas.

Com o aumento das exigências solicitadas ao transporte ferroviário, nomeadamente maiores velocidades e maior capacidade de transporte, as locomotivas a vapor tiveram que ser substituídas por locomotivas diesel e elétricas³ (Figura 2.2).



Figura 2.2 – Locomotivas: a vapor, diesel e elétrica [10]

A constante evolução e uso, fez com que em aproximadamente um século (entre 1850 e 1947), a extensão de caminhos-de-ferro, em termos mundiais, passasse de 32 000 km para 1 260 000 km. Em termos de velocidade, o record atual é de 574.8 km/h obtido no dia 3 de Abril de 2007 numa viagem experimental realizada em França, na Linha Paris – Estrasburgo (Figura 2.3).



Fonte: [10]

Figura 2.3 – TGV: Velocidade Máxima de 574.8 Km/h [23]

² Diferença entre as faces de guiamento dos carris.

³ As locomotivas (enquanto unidades independentes) não são a única forma de tração. Atualmente, a maioria dos comboios de passageiros é baseada na utilização de unidades (carruagens) providas de tração própria.



2.3 Em Portugal

A tentativa de modernização começou após as guerras civis que ocorreram entre 1828 e 1834. O país ainda se encontrava bastante fragilizado, havendo uma escassez de capital que não permitia a disponibilização dos necessários investimentos necessários à construção de linhas de caminho-de-ferro.

No ano de 1844, ainda durante o regime Cabralista, foi inaugurada a Companhia das Obras Públicas. Contudo a execução de linhas férreas não foi algo prioritário. Salienta-se no entanto que em Inglaterra no ano de 1825 já havia sido construída a primeira linha ferroviária, o que já per si, a nível nacional, denotava algum atraso na evolução deste modo de transporte.

No regime da Regeneração, apostou-se na construção de vias férreas, tendo no ano de 1856 sido inaugurado o troço Lisboa – Carregado (Figura 2.4).

Apenas meio século depois se considerou que existia um sistema ferroviário aceitável...



Figura 2.4 – Inauguração do troço Lisboa - Carregado [10]

2.4 Os Caminhos-de-Ferro Subterrâneos (Metropolitano)

A existência de um sistema ferroviário com alguma imponência despertou o interesse para novos horizontes. Em 1863 o Metropolitano de Londres, com base numa ideia de Charles Pearson, construiu a primeira linha subterrânea.

Em Portugal, o primeiro projeto de caminho-de-ferro subterrâneo para a cidade de Lisboa surgiu em 1888, sendo da autoria do engenheiro militar Henrique Lima. Este projeto não foi no entanto materializado devido à grande crise financeira nacional e internacional à época. Apenas após a Segunda Guerra Mundial, no ano de 1959, é que foi inaugurado este novo meio de transporte.

O primeiro troço construído tinha uma configuração em “Y”, sendo constituído essencialmente por três eixos (Figura 2.5), concretamente:

- O primeiro eixo ligava a zona de Entrecampos ao Marquês de Pombal;
- O segundo eixo que ligava Jardim Zoológico e confluía também no Marquês;
- O terceiro entre o Marquês e os Restauradores.

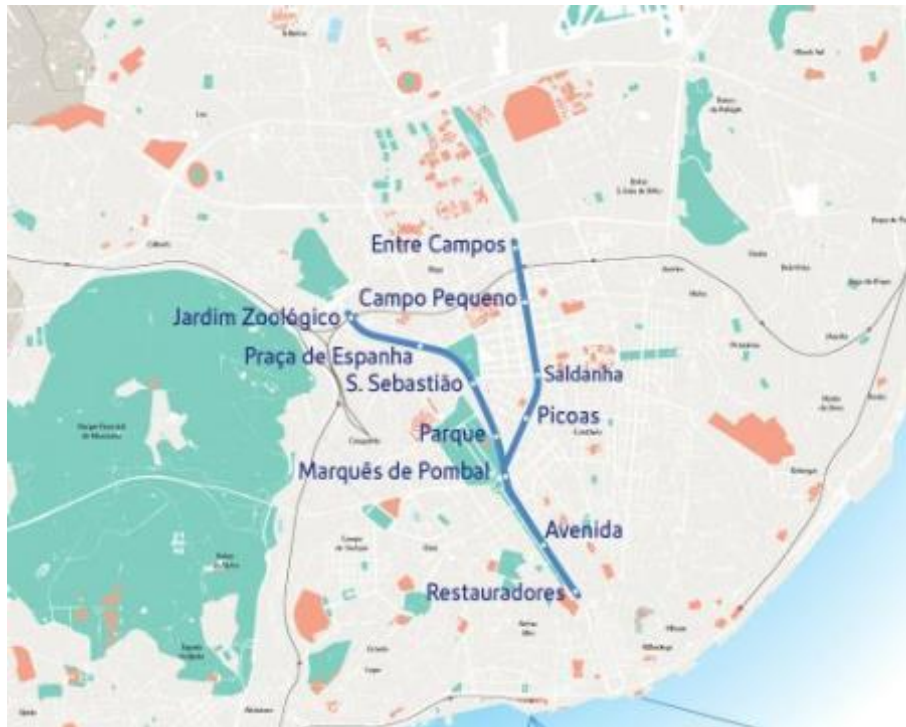
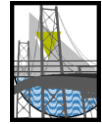


Figura 2.5 – Rede do Metropolitano de Lisboa em 1959 [24]

A evolução da rede do Metropolitano de Lisboa foi gradual, registando alguns picos na fase de construção de grandes empreendimentos, como por exemplo a Expo98, conforme se pode observar na Figura 2.6.

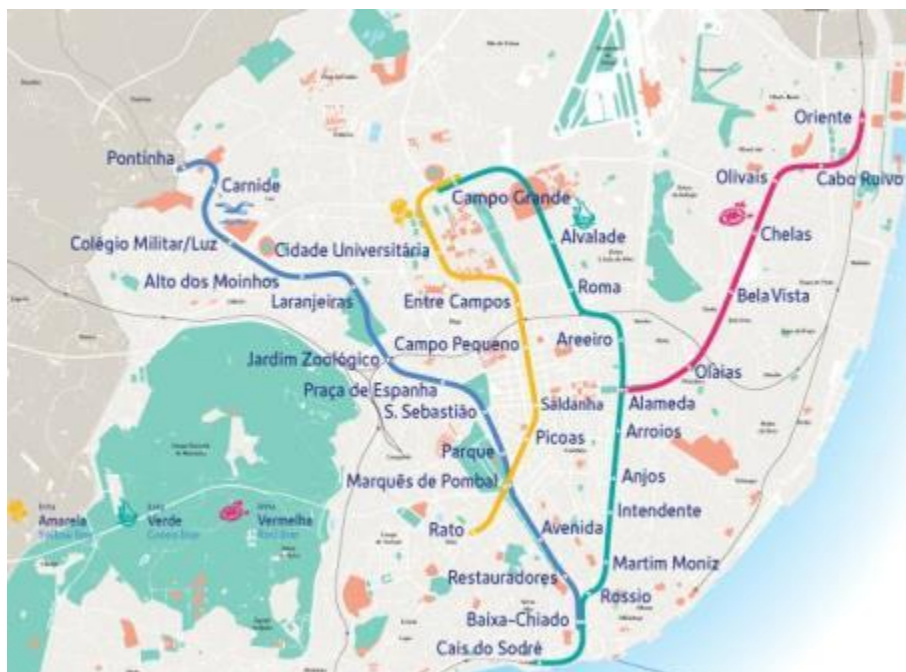
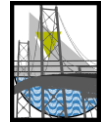


Figura 2.6 – Rede do Metropolitano de Lisboa em 1998 [24]



Atualmente, a rede já apresenta uma estrutura com alguma imponência, (Figura 2.7), situando-se no entanto aquém de redes de metropolitano de grandes cidades europeias, como por exemplo Barcelona, Paris ou Londres, este último com 15 linhas, uma extensão da ordem dos 400 km e 270 estações e que é utilizado diariamente por cerca de 2.95 milhões de passageiros (Figura 2.8).

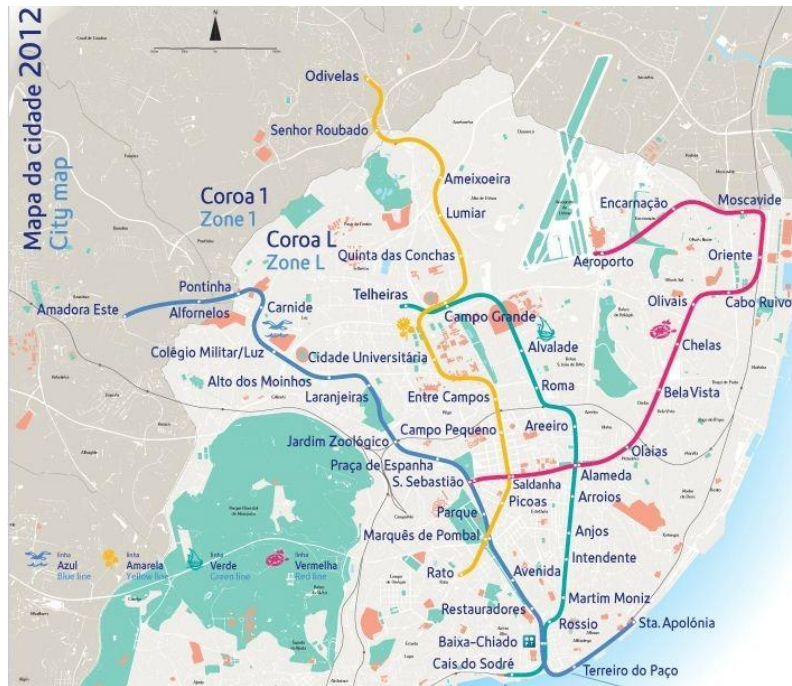


Figura 2.7 – Rede do Metropolitano de Lisboa em 2012 [24]

Fonte: [24] e [37]



Figura 2.8 - Rede do Metropolitano de Londres 2012 [37]



3. A VIA FÉRREA

A Via Férrea, enquanto sistema guiado, está dotado de diversos elementos que em termos gerais, conforme apresentado na Figura 3.1, se enquadram em dois níveis, (infraestrutura e superestrutura)⁴.

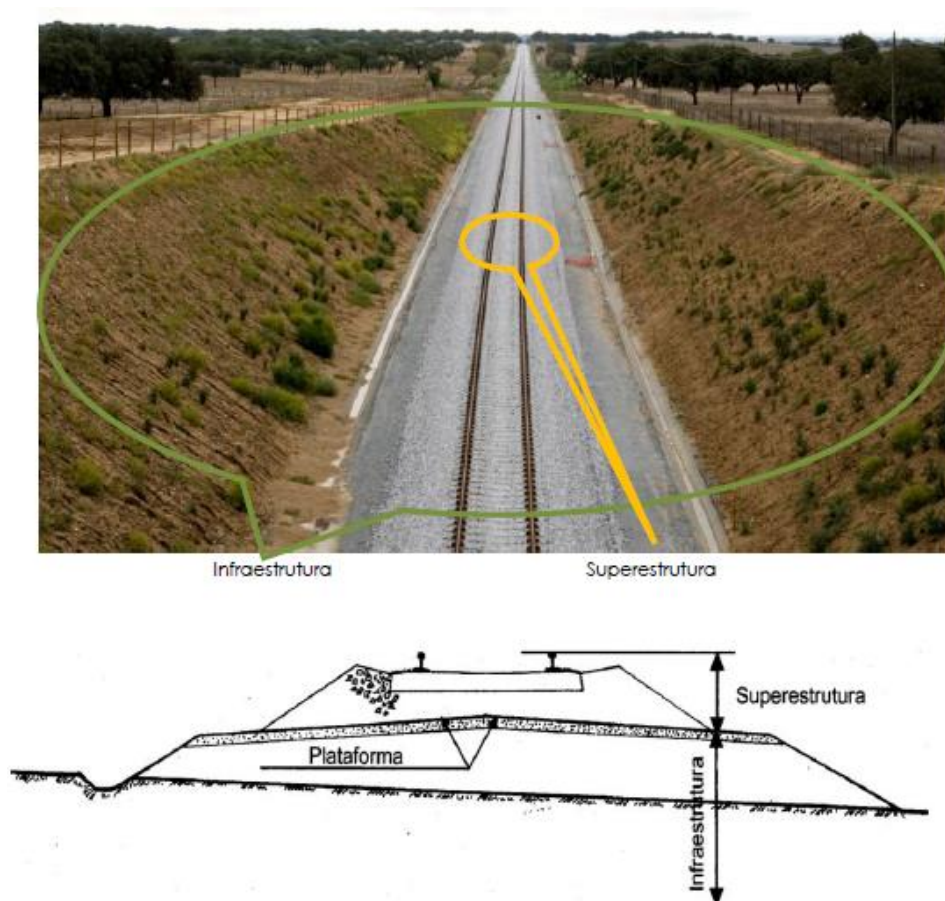


Figura 3.1 – Infraestrutura e Superestrutura [30]

Em síntese, a **infraestrutura** contempla as camadas localizadas sob o balastro (plataforma), os aterros e taludes, os sistemas de drenagem bem como obras de arte (passagens inferiores, pontes, pontões e viadutos⁵).

Por outro lado, a **superestrutura** compreende o balastro e armamento de via, ou seja os carris, travessas, fixações e elementos de ligação (por exemplo barretas).

⁴ O Exemplo apresentado refere-se a uma via balastrada, sendo que para uma via não balastrada, pese a existência igualmente dos dois níveis (infraestrutura e superestrutura), regra geral, os seus componentes são diferentes

⁵ As Passagens Superiores ao Caminho-de-ferro não se enquadram na Via Férrea.



3.1 Tipos de Via

Conforme referido no ponto anterior, a via férrea, embora direcionada para o mesmo fim (transporte de pessoas e bens), pode contemplar diferentes tipos, os quais possuem materiais e morfologias diferentes. Forma simplificada, conforme indicado na Figura 3.2, podem considerar-se dois tipos:

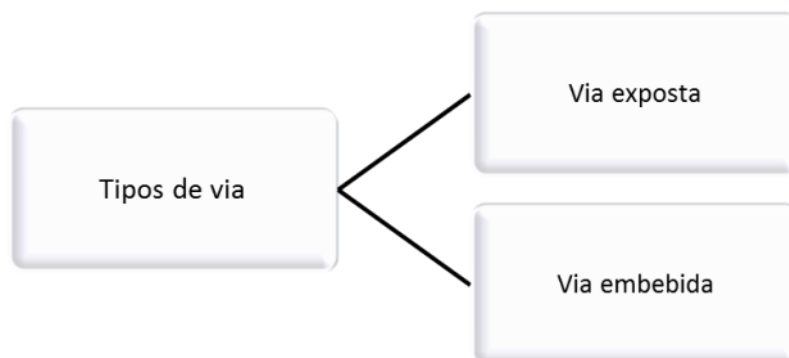


Figura 3.2 – Tipos de Via

Tanto a via exposta, como a via embebida podem ter como suporte lajes de betão ou plataforma/balastro. A título de exemplo, refere-se uma Passagem de Nível, numa via balastrada (Figura 3.3), onde, mediante a colocação de estrados (por exemplo: madeira ou pré-fabricados) se obtém, embora numa seção pontual, uma via embebida.



Figura 3.3 – Estrados pré-fabricados em Passagem de Nível (Via balastrada / embebida) [34]



Para cada um dos tipos de via identificados anteriormente procede-se em seguida a uma caracterização sumária e sucinta dos seus componentes e principais características.

3.2 Via exposta

Por via exposta deverá entender-se o tipo de via em que o carril não está confinado lateralmente.

3.2.1 Superestrutura

A **superestrutura** engloba o balastro e armamento de via, ou seja os carris, travessas, fixações e elementos de ligação (por exemplo barretas). Procede-se em seguida a uma breve caracterização de cada um destes componentes.

Carril

O carril é a componente principal da superestrutura da Via Férrea, estando-lhe associadas funções de extrema importância que garantem o bom funcionamento da via. Este elemento garante as seguintes funções:

- Guiamento das rodas;
- Condução da energia elétrica nas vias eletrificadas (retorno);
- Resistência às cargas transmitidas pelo material circulante;
- Transmissão das cargas aos restantes elementos da superestrutura e por arrasto da infraestrutura.

A evolução dos carris foi uma constante ao longo do tempo, não só no que se refere à forma, mas também ao seu peso e mesmo ao tipo de material constituinte. No início dos caminhos-de-ferro, o carril era fabricado em ferro fundido, material que ao longo do tempo, decorrente das necessidades de incremento de velocidade e de capacidade de carga, se mostrou ser bastante frágil. Atualmente, o carril é constituído por aço laminado.

O peso do carril é diverso, sendo os mais comuns os de 54 kg/m e 60 kg/m⁶, existindo no entanto outras variantes com pesos inferiores: 26, 30, 36, 40 e 45 kg/m, que gradualmente estão a cair em desuso.

⁶ Valores aproximados



Independentemente da forma, num carril existem 3 partes distintas (Figura 3.4):

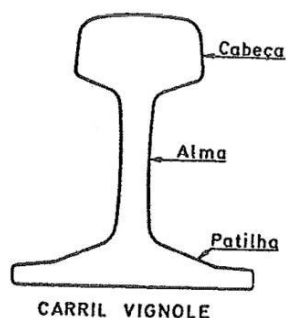


Figura 3.4 – Partes constituintes do carril [11] versão editada

Quanto ao seu comprimento importa reter que em termos de fabrico podem ser atingidos valores na ordem da(s) centena(s) de metros. No entanto, dadas as limitações existentes no seu transporte até ao local de aplicação, o comprimento usual é de 18 m.

Posteriormente, em estaleiro é habitual transformar estes elementos iniciais em barras maiores, nomeadamente 108 ou 144 metros⁷.

Quando as barras são ligadas entre si por soldaduras (Figura 3.5), aluminotérmicas ou elétricas, obtém-se o que vulgarmente se designa por BLS – Barra Longa Soldada. Quando tal não acontece, a designação usual é a de via em “Barra Curta”.



Figura 3.5 - Soldadura aluminotérmica [22]

⁷ Quando é possível utilizar o transporte ferroviário até ao ponto de aplicação



Travessas

As travessas têm como principais funções garantir a distância fixada originalmente entre as duas filas de carris e a transmissão das cargas às camadas inferiores.

A distância entre as duas filas de carris (faces de guiamento) designa-se por “bitola”. A bitola predominante é a designada bitola europeia (também conhecida por UIC), em que a distância é de 1435 mm. Em Portugal⁸ existem várias bitolas, nomeadamente:

- 1668 mm – REFER - Rede Ferroviária Nacional (Linhas de via larga);
- 1435 mm – Metropolitano de Lisboa, Metropolitano do Porto e Metro Sul do Tejo;
- 1000 mm – REFER – Rede Ferroviária Nacional (Linhas de via estreita);
- 900 mm – CCFL – Companhia Carris de Ferro de Lisboa (Rede de Elétricos).

Na Figura 3.6, estão representadas as bitolas 1435 mm e 1668 mm.

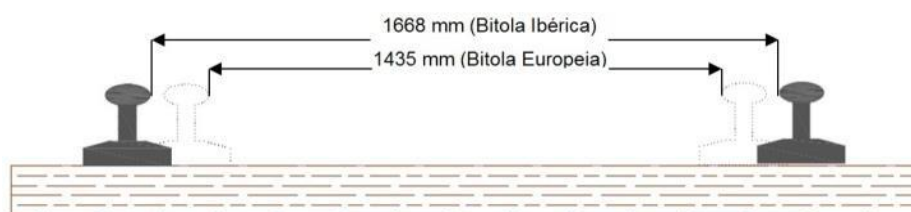


Figura 3.6 - Bitola Ibérica e Europeia

Existem diversos tipos de travessas, estas diferenciam-se umas das outras no essencial pela sua forma e composição. Assim, as mais vulgares são:

- Travessas de madeira;
- Travessas de betão;
- Travessas metálicas.

Para cada uma das situações identificadas procede-se em seguida a uma breve caracterização enaltecendo as suas vantagens e desvantagens.

⁸ Tal como em Espanha e ainda em outros países europeus, como por exemplo Irlanda e Rússia, também são identificadas bitolas diferentes da bitola 1435 mm



a) Travessas de madeira

Podem ser em pinho (Figura 3.7), azobé ou carvalho⁹, sendo que as dimensões mais usuais são de 2600 mm x 260 mm x 160 mm e um peso da ordem dos 100 Kg.



Figura 3.7 – Travessas de madeira [11]

No Quadro 3.1, apresentam-se as principais vantagens e desvantagens associadas às travessas de madeira.

Quadro 3.1 - Vantagens e desvantagens associadas às travessas de betão

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none">• Fácil fabrico e manuseamento;• Garante um bom nivelamento;• Utilização em pontes e pontões metálicos, ou em zonas onde existam dificuldades de obtenção de gabarito vertical¹⁰ (por exemplo túneis), ou em zonas onde o peso próprio das travessas seja determinante;• Adaptabilidade.	<ul style="list-style-type: none">• Durabilidade variável e muito dependente das condições climatéricas;• Não garante uma fixação adequada dos carris;• Facilmente incendiável;• Regra geral necessitam de um tratamento (ex: creosotagem) para uma maior resistência aos agentes químicos e parasitas.

⁹ Atualmente existem estudos para a execução de travessas a partir de lamelados de madeira, no sentido de permitir um maior aproveitamento de “restos” de uma matéria que é cada vez mais escassa.

¹⁰ A altura destas travessas pode ser reduzida até 140mm



b) Travessas de betão

No caso das travessas de betão existem dois tipos a ter em conta:

- Travessas bi-bloco (Figura 3.8);
- Travessas monobloco (Figura 3.9).

Com pesos próprios que em valor médio se situam nos 200 e 300 kg, respetivamente para travessas bi-bloco e monobloco, estas travessas têm uma utilização generalizada.

As travessas bi-bloco são constituídas por 2 blocos em betão armado, ligados por um elemento metálicos (cantoneira).

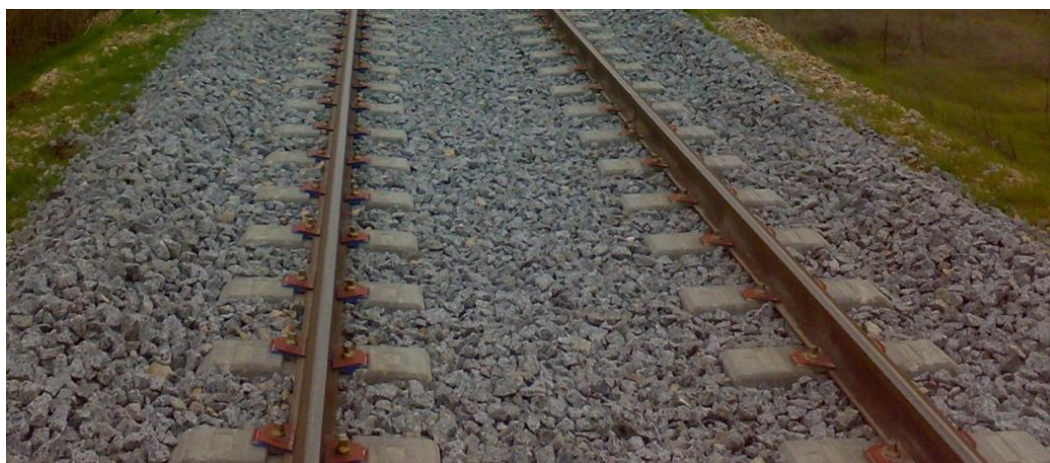


Figura 3.8 – Travessas bi-bloco de betão [22]

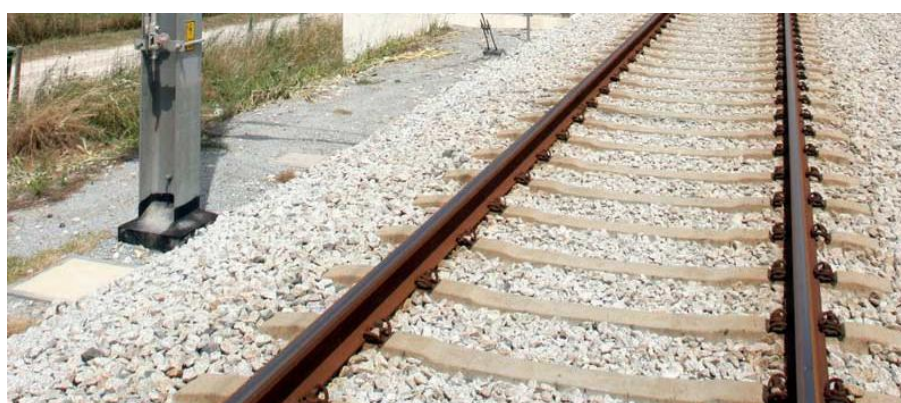


Figura 3.9 – Travessas monobloco de betão [22]

As vantagens de desvantagens associadas às travessas de betão encontram-se explicitadas no Quadro 3.2.



Quadro 3.2 - Vantagens e desvantagens associadas às travessas de betão

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none">• Asseguram uma boa fixação;• Elevada durabilidade;• Dado o seu peso, permitem uma maior estabilidade na via, designadamente em termos transversais.	<ul style="list-style-type: none">• Decorrente do seu peso, maior dificuldade no transporte e aplicação.

Na tentativa (até agora sem grande êxito...) de garantir a interoperabilidade com a rede europeia algumas das linhas construídas ou renovadas recentemente em Portugal (e desde 1990 em Espanha), designadamente a Variante de Alcácer, foram utilizadas travessas monobloco polivalentes.

Trata-se de uma travessa (Figura 3.10), que ao possuir quatro furações, permite a adoção das duas bitolas (Ibérica e Europeia), se bem que nunca em simultâneo.

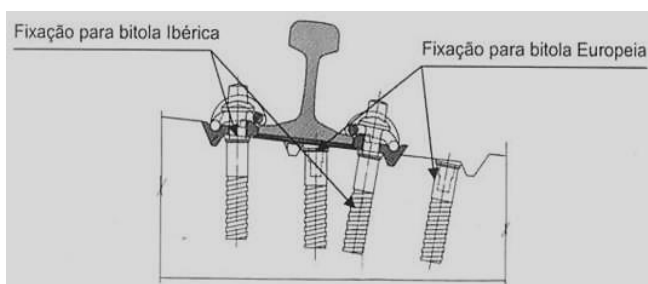
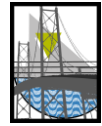


Figura 3.10 – Esquema de fixação da travessa monobloco polivalente [11]

Existe ainda outra variante, travessas monobloco para 3 carris (Figura 3.11), que permitem, para a mesma via, a coexistência em simultâneo de duas bitolas (via algaliada). Trata-se de uma solução que nos últimos tempos tem tido evolução na Rede Espanhola, em particular nas ligações às zonas portuárias.



Figura 3.11 – Travessa monobloco de betão para 3 carris [11]



c) Travessas metálicas (Figura 3.12)

Com pouca utilização no nosso país, apresentam pesos inferiores a 100 kg. As respetivas vantagens e desvantagens constam no Quadro 3.3.



Figura 3.12 - Travessas metálicas [22]

Quadro 3.3 - Vantagens e desvantagens associadas às travessas metálicas

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none">• Leves;• Fácil manuseamento.	<ul style="list-style-type: none">• Não confere uma estabilidade adequada à via;• Problemas de oxidação e corrosão;• Impossibilidade (dificuldades) de colocação das mesmas nas linhas eletrificadas, pois não garantem isolamento;• Ampliação do nível de ruído na via.



Materiais de ligação

Os materiais de ligação servem para garantir a continuidade e alinhamento dos carris. Esta ligação pode ser obtida através de juntas aparafusadas ou soldaduras.

As juntas aparafusadas podem ser de dois tipos, normais ou isolantes. As juntas normais são constituídas por barretas colocadas de cada um dos lados do carril (Figura 3.13), sendo posteriormente ligadas por parafusos, porcas e anilhas.

As juntas isolantes são similares, contudo usam-se normalmente em vias eletrificadas, permitindo desta forma isolar uma outra barra caso seja necessário. Dentro destas últimas existem duas variantes, a junta isolante colada, usada nas barras longas soldadas e a junta isolante normal usada nas barras com juntas.

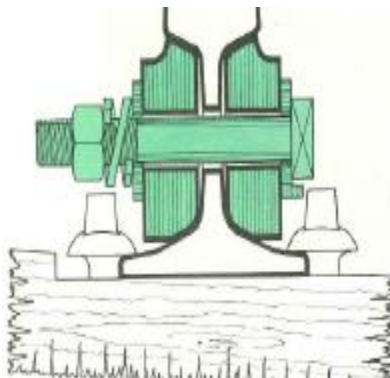


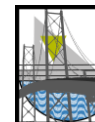
Figura 3.13 - Juntas de ligação. Modo de ligação do sistema barreta, parafuso, porca e anilha [11]

No caso das juntas soldadas as mesmas podem ser obtidas a partir de duas tecnologias:

- Aluminotérmica
- Elétrica.

A soldadura aluminotérmica tem por base a reação química do alumínio com o oxigénio dos óxidos metálicos, libertando facilmente metal. Trata-se de uma reação exotérmica, libertando calor para o exterior, sendo que apesar das altas temperaturas libertadas necessita de pré-aquecimento.

A soldadura elétrica consiste na passagem de uma corrente de baixa voltagem e alta intensidade no topo dos carris a ligar. Estes encontram-se fixos por pinças da máquina de soldar, que introduz uma força axial da ordem das 40 a 50 toneladas, permitindo desta forma uma soldadura por interpenetração molecular.



Regra geral, as soldaduras aluminotérmicas são realizadas em “situ”, enquanto que as elétricas podem ser realizadas em estaleiro fixo ou móvel. Em termos de qualidade da ligação, a soldadura elétrica confere uma melhor qualidade de ligação que a aluminotérmica, apresentando um número reduzido de microfissuras.

Fixações

Estas componentes têm como principal função fixar os carris às travessas, podendo as mesmas ser consideradas em dois grupos:

- Fixações rígidas (Figura 3.14);
- Fixações elásticas (ou móveis) (Figura 3.15).

As fixações rígidas são usadas em travessas de madeira, sendo necessário cuidados acrescidos ao nível de aperto por forma a não estragar as fibras da madeira. Este tipo de fixação, contrariamente as elásticas não garante o aperto permanente do carril.



Figura 3.14 – Fixação rígida [11]



Figura 3.15 – Fixação elástica [11]

O mercado disponibiliza diversos tipos de fixações, sendo as suas designações, regra geral, associadas ao fabricante, designadamente Nabla, Vossloh, Pandrol, etc.



Camada de assentamento da via

Nas linhas à superfície, a camada de assentamento da via situa-se entre as travessas e o terreno de fundação. A sua constituição varia consoante o tipo de utilização e exigências pretendidas e o solo de fundação¹¹.

Regra geral os materiais usados para o assentamento das travessas são balastro (Figura 3.16) ou lajes de betão (Figura 3.17).



Figura 3.16 – Via assente em balastro [22]



Figura 3.17 - Via assente em laje de betão [22]

¹¹ O local de execução, incluindo o País também pode ser relevante



Na Rede Ferroviária Nacional, a generalidade das vias são assentes em balastro. No Metropolitano de Lisboa, embora maioritariamente a rede seja construída sobre lajes de betão, ainda subsiste alguma extensão de via balastrada. A título de exemplo referem-se cerca de 12 km de via dupla em galeria entre as estações Jardim Zoológico - Restauradores (Linha Azul), Entre Campos - Marques de Pombal II (Linha Amarela) e Rossio - Alvalade (Linha Verde).

O balastro é constituído por pedra granítica (ou calcária) devidamente calibrada através de fusos próprios. A calibração é realizada mediante as normas internacionais ou nacionais¹², apresentando as dimensões usuais no intervalo entre 25 e 50 mm.

No nosso país é um recurso relativamente abundante, pelo que a sua utilização se traduz numa solução mais económica.

Nos países nórdicos, devido à escassez destes recursos e ao elevado custo da importação (nomeadamente decorrente do transporte), a metodologia para a execução desta camada passa pelo recurso a lajes de betão.

Tanto no caso do balastro como da laje de betão, esta camada é um elemento bastante importante de todo o sistema, conferindo o equilíbrio necessário para o seu correto funcionamento.

À camada de assentamento da via estão associadas diversas funções, destacando-se:

- Absorção de vibrações (mecânicas e sonoras);
- Flexibilidade e amortecimento a toda a estrutura durante a passagem do comboio;
- Distribuição de todas as cargas provenientes dos elementos superiores;
- Drenagem para o exterior da plataforma e impermeabilização das camadas inferiores.

¹² No caso da REFER é utilizada a IT.GEO.001



3.2.2 Infraestrutura

A infraestrutura pode ser também definida como a plataforma da via. Esta não é mais do que um apoio a toda a superestrutura de via, correspondendo à plataforma de terraplenagem nas linhas existentes e ao limite superior da camada de sub-balastro nas linhas mais recentes [29]. A composição generalizada da mesma pode passar pela existência de uma camada de sub-balastro, uma camada de coroamento e uma camada de aterro.

O dimensionamento das camadas de apoio da via é fortemente condicionado pelas características e comportamento dos materiais que estão presentes na fundação, sendo por vezes necessário proceder à substituição de solos ou ao tratamento destes [27].

A fundação contribui também de forma considerável para a deformação (reversível e permanente) da via, designadamente ao nível do carril, influenciando a deterioração dos seus elementos constituintes. [27]

A sua principal função é absorver os esforços provenientes da circulação das composições, tendo cada uma das camadas uma especificidade funcional. A camada de sub-balastro impede a ascensão dos finos dos solos de fundação funcionando desta forma como um filtro, a camada de coroamento permite a estabilização e regularização de toda a plataforma e a camada de aterro (quando aplicável) é a responsável por toda a resistência da plataforma.

Existem diversas classes de plataforma, cujas características podem ser observadas no Quadro 3.4. Resultantes das características dos solos que a compõem as mesmas podem traduzir-se em: P1 – Plataforma de má qualidade; P2 – Plataforma de qualidade média e P3 – Plataforma de qualidade média. As principais.

Quadro 3.4 – Classes de Plataformas [27]

Qualidade do solo de fundação	Classe da plataforma	Camada de leito	
		Qualidade do material	Espessura (m)
QS1	P1	QS1	-
	P2	QS2	0,50
	P2	QS3	0,35
	P3	QS3	0,50
QS2	P2	QS2	-
	P3	QS3	0,35
QS3	P3	QS3	-



Relativamente à qualidade dos Solos, os mesmos podem ser classificados de acordo com o Quadro 3.5

Quadro 3.5 – Qualidade dos solos [27]

Qualidade do solo	Identificação	CBR (%)	EV_2 (MPa)
QS1	Solos com mais de 15% de finos ⁽¹⁾ , estado hídrico “médio” ou “seco”	3 a 6	15 a 25
QS2	Solos com 15% a 40% de finos, estado hídrico “seco” e boas condições hidrológicas e hidrogeológicas	6 a 20	25 a 80
	Solos com 5% a 15% de finos, estado hídrico “seco”		
QS3	Solos com menos de 5% de finos, bem graduados e com partículas de dureza elevada	>20	>80

(1) $\phi < 0,060\text{mm}$

Salienta-se que, ao contrário do que seria do senso comum, uma camada com elevada rigidez poderá não se traduzir na melhor solução a adotar. Este aspeto assume maiores necessidades de estudo em zonas de variação brusca da referida rigidez¹³.

Para além dos custos de construção é fundamental interiorizar os custos que decorrem da manutenção ao longo da vida útil da linha.

Tendo por base esta filosofia, uma plataforma com uma rigidez bastante baixa implicará pouca capacidade de suporte e conseqüentemente maiores gastos em ações de nivelamento. Por outro lado, uma plataforma muito rígida implicará provavelmente grande desgaste no balastro e potenciar a degradação do restante material da superestrutura.

Pode-se considerar-se como um dado adquirido que o nível de desgaste/deterioração não depende exclusivamente dos materiais constituintes e da sua execução, estando igualmente relacionado com as exigências solicitadas à plataforma¹⁴, tanto em termos de carga, como das frequências na sua solicitação.

¹³ Por exemplo transição entre obras de arte e aterros

¹⁴ Independentemente de se tratar de uma via exposta ou embebida



3.3 Via embebida

Uma via embebida permite a continuidade da superfície, permitindo desta forma tanto a circulação ferroviária como a rodoviária e pedonal. Geralmente é constituída por uma laje de betão, podendo a mesma ter continuidade até ao plano de rolamento ou ser parcialmente substituída por material de revestimento, como por exemplo, betuminoso, calçada, relva, etc.

Este tipo de via assegura uma redistribuição mais eficaz dos esforços e atenuação de vibrações e ruído, muito devido à forma como é construída.

Uma das possíveis soluções passa pela construção de uma laje de betão, construída de forma a contemplar a existência de sulcos do tipo “U”, conforme se pode observar na Figura 3.18. Posteriormente assenta-se o carril (Figura 3.19), a que se segue a colocação de material resiliente (por exemplo cortiça e poliuretano) que o irá acondicionar quase por completo o carril, deixando apenas a face superior (plano de rolamento) à vista.



Figura 3.18 – Construção de via embebida [25]



Figura 3.19 – Colocação do carril em via embebida [15]



4. RUÍDO E VIBRAÇÃO

4.1 O Ruído

A relação do ruído com a envolvente é uma relação bilateral, ou seja, o ruído condiciona a envolvente, contudo o ruído é também condicionado pela envolvente. Antes de se perceber o tipo de relação associada é conveniente definir o que é o ruído.

Segundo a Agência Europeia para a Saúde e Segurança no Trabalho [36], o ruído é um som indesejado cuja intensidade é medida em decibéis (dB). A variação da escala de decibéis é realizada de forma logarítmica, salientando-se que o aumento de 3 dB representa um aumento na intensidade de ruído para o dobro.

Por exemplo, uma conversa normal atinge valores na ordem dos 65 dB e o valor atingido por uma pessoa a gritar possui valores na ordem do 80 dB, apesar do diferencial ser de 15 dB a intensidade de ruído é 30 vezes superior.

A mesma fonte refere que a apreciação do grau de incómodo se encontra diretamente associada ao recetor, sendo que para os Humanos esta apreciação varia de indivíduo para indivíduo.

A avaliação da perigosidade de um determinado ruído não se limita à intensidade do mesmo sendo a duração da exposição é um fator igualmente determinante.

A escala de valores de nível de pressão sonora (Figura 4.1), varia entre 0 dB (A) limiar da audição e 130 dB (A) a que corresponde o limiar da dor.



Figura 4.1 – Escala de Ruído [3]



Quando os limites do ruído ultrapassam os 55 dB (A), o mesmo é considerado como um agente poluidor [12]. De acordo com a mesma fonte e ainda segundo o relatório da implementação da Diretiva 2002/49/EC [EC 2011], estima-se que um elevado número de pessoas são afetadas pelo ruído, na sua faceta mais nociva (Quadro 4.1).

Quadro 4.1 - Sumarização do nº de pessoas afetadas pelo ruído “poluente” [12]

SECTION	NUMBER OF AFFECTED PEOPLE BY NOISE LEVELS ABOVE 55 DB(A) L_{DEN} [MILLION]	NUMBER OF AFFECTED PEOPLE BY NOISE LEVELS ABOVE 50 DB(A) L_{NIGHT} [MILLION]
Agglomerations > 250,000 inhabitants		
All roads	55.8	40.1
All railways	6.3	4.5
Industrial zones	3.3	1.8
Important infrastructures outside agglomerations		
Main roads	34	25.4
Main railways	5.4	4.5
Main airports	1	0.3

Numa primeira abordagem não é possível observar o impacto do ruído ferroviário no espaço europeu, contudo uma distribuição percentual da população afetada associada a uma escala cromática, permite a visualização das zonas mais atingidas (Figura 4.2).

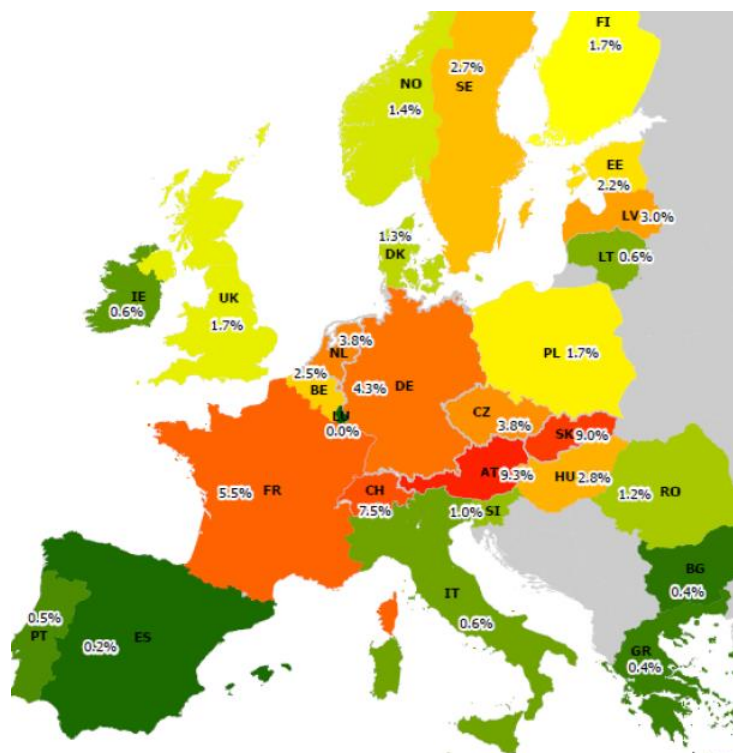
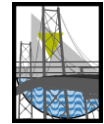


Figura 4.2 – População (%) afetada pelo ruído ferroviário na Europa [12]



Na figura anterior, a tonalidade das zonas está de acordo com as cores de um semáforo, o verde possui valores reduzidos de exposição, seguindo-se o amarelo e posteriormente a cor laranja com valores mais elevados e por fim a cor de “alerta” o vermelho onde a percentagem de população exposta é bastante significativa.

Portugal, de acordo com a informação referida, apresenta valores bastante reduzidos, traduzidos numa percentagem de população exposta na ordem dos 0,5%, enquanto países como a Áustria e a Eslováquia apresentam valores na ordem dos 9%. [12].

O impacto que o ruído tem na saúde de cada indivíduo, assume cada vez mais importância. Estima-se que cerca de 1 milhão de anos de saúde saudável é perdida todos os anos na EU. Estas perdas advêm de diversos fatores, sendo os mais comuns os que se indicam no Quadro 4.2.

Quadro 4.2 – Principais alterações na saúde humana devido à exposição excessiva de ruído [12]

EFFECT		INDICATOR	THRESHOLD [DB(A)]
Biological effects	Change in cardiovascular activity	see footnote 3 ³	see footnote 3
	EEG awakening	$L_{Amax,inside}$	35
	Motility, onset of motility	$L_{Amax,inside}$	32
	Changes in duration of various, in sleep structure and fragmentation of sleep	$L_{Amax,inside}$	35
Sleep quality	Waking up in the night and/or too early in the morning	$L_{Amax,inside}$	42
	Prolongation of the sleep inception period, difficulty getting to sleep	see footnote 3	see footnote 3
	Sleep fragmentation, reduced sleeping time	see footnote 3	see footnote 3
Well-being	Increased average motility when sleeping	$L_{Amax,inside}$	42
	Self-reported sleep disturbance	$L_{Amax,inside}$	42
	Use of sleeping pills, etc.	$L_{Amax,inside}$	40
Medical conditions	Environmental insomnia ⁴	$L_{Amax,inside}$	42



O documento elaborado pelo Instituto do Ambiente - Ruído e a Cidade - tradução do documento original do *ministre de l'Equipement et de l'Aménagement du territoire- Le bruit et la ville*, consegue transmitir de forma simples todas as noções relacionadas com o ruído.

Segundo o referido documento, o ruído, além de ser um som indesejado pode ser definido como uma variação da pressão atmosférica que o ouvido humano consegue detetar. A pressão sonora corresponde ao diferencial entre a pressão ambiente instantânea e pressão atmosférica.

Muitas vezes é possível verificar que a unidade de medição (dB) está associada a um fator de ponderação A, sendo representado como dB (A). Este fator de ponderação surge com o intuito de garantir mais fiabilidade ao valor de medição, aproximando o valor medido à sensação com que o ser humano obtém de um determinado ruído. Sem esta correção, a situação não era fiável na medida em que ruídos inferiores a 20 Hertz e superiores a 20 000 Hertz não são sensíveis ao ser humano, conforme a Figura 4.3.

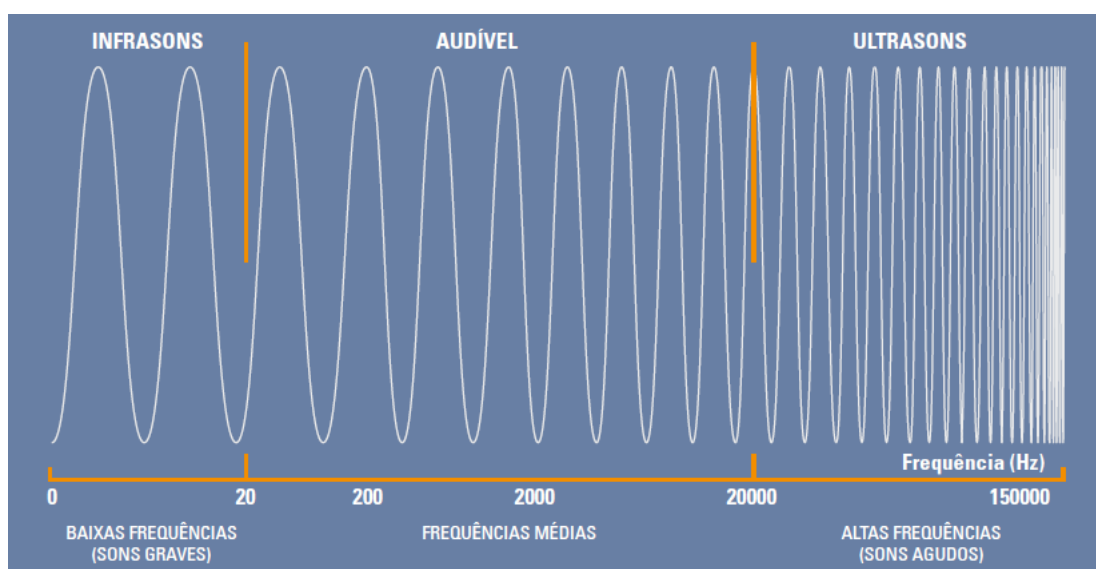


Figura 4.3 - Espectro de frequências associadas ao ruído [4]

Na Figura 4.4, é possível analisar o andamento das curvas de ponderação, sendo a “A” o caso generalizado e as curvas “B” e “C” utilizadas para casos específicos. As curvas de ponderação têm igualmente como finalidade garantir maior fiabilidade à medição, ou seja, visto que o equipamento de medição faz uma medição numérica, torna-se necessário adequar a medição ao impacto no ouvido humano.

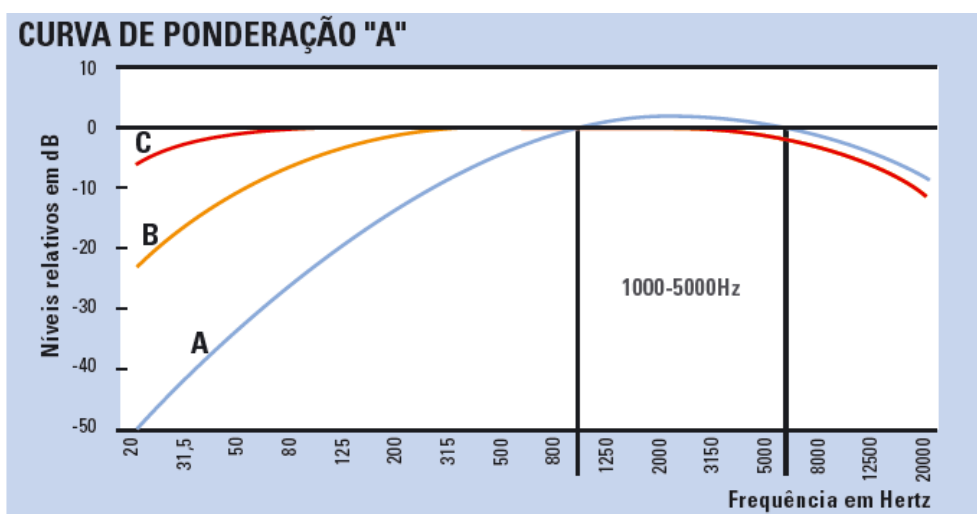


Figura 4.4 - Curva de ponderação [4]

4.1.1 Ponderação da pressão sonora face a várias fontes

É do senso comum que um determinado ruído com uma pressão sonora irá mascarar um outro cujo nível de pressão sonora seja inferior.

Devemos pensar da mesma forma em situações em que inicialmente exista uma fonte sonora a emitir um certo nível de pressão sonora e posteriormente ocorra um acréscimo do número de fontes sonoras a emitir o mesmo nível de ruído, sendo que neste caso, o valor total do nível de ruído não se irá traduzir numa soma aritmética simples face ao número de fontes sonoras.

Por forma a avaliar o valor final da pressão atmosférica do conjunto, podem ser consideradas duas situações, conforme indicado no Quadro 4.3.

Quadro 4.3 - Critérios para o cálculo da pressão sonora final de um conjunto de fontes sonoras

$L_{p2} - L_{p1} > 10$	O valor do conjunto assume o valor de pressão sonora de maior amplitude.
$L_{p2} - L_{p1} \leq 10$	Para este caso deve ter-se em conta o gráfico de adição de pressão sonora (Figura 4.5), contudo, caso o diferencial seja 0 soma-se 3 dB(A) ao valor da pressão sonora correspondente a um elemento.

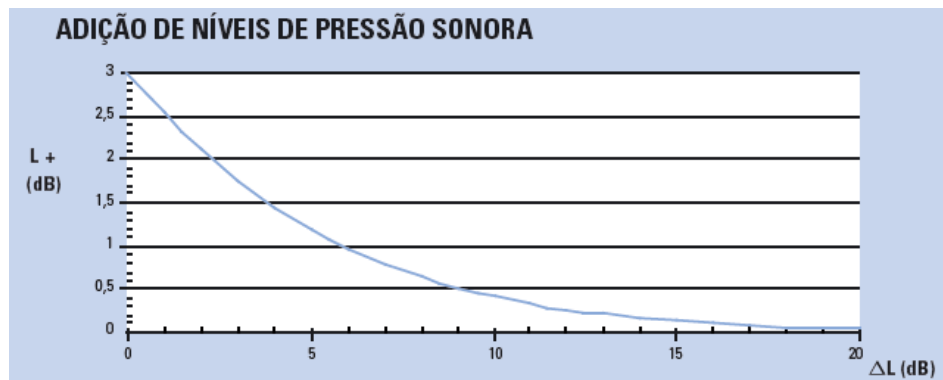


Figura 4.5 – Gráfico de adição de níveis de pressão sonora [4]

De salientar que no caso de existirem vários receptores devemos fazer o procedimento dois a dois.

4.1.2 Propagação do ruído

O modo de propagação do ruído tem em muito a ver com o meio onde o mesmo se propaga. Neste âmbito é possível caracterizar dois tipos de meios:

- Um refletor (ex.: cidade) que facilita a propagação;
- Um absorvente (ex.: campo) que dificulta a mesma ação.

O método de propagação é assim um fenómeno muito simples, sendo que a intensidade do mesmo vai diminuindo com o afastamento à fonte sonora. Contudo com o aparecimento de obstáculos, uma parte é absorvida e outra é refletida. Na Figura 4.6 é possível visualizar uma esquematização da metodologia.

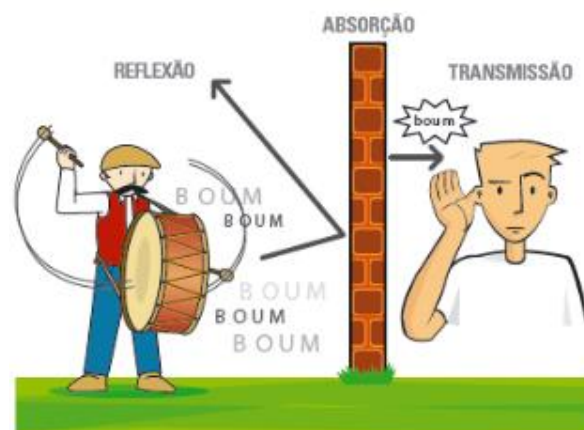


Figura 4.6 – Metodologia de propagação do ruído [4]



O processo para minimização do ruído passa então por criar obstáculos (entre a fonte e o recetor) por forma a que o mesmo vá enfraquecendo e preferencialmente seja absorvido.

Pensando no ruído como uma linha de água proveniente de uma magueira, é fácil perceber o que irá suceder se a mesma se deparar com um obstáculo, a água irá fazer ricochete com o elemento de barreira.

Existe porém um fenómeno (difração) associado às descontinuidades e limites dos elementos de barreira, que se caracteriza pela quantidade de ruído que chega ao recetor de forma indireta.

Seguindo a analogia anterior, se uma pessoa se localizar atrás de uma barreira e se a linha de água for direcionada para os bordos do elemento de barreira, a mesma irá ser atingida com algumas partículas de água. Analogamente é óbvio perceber que apesar da pessoa ser atingida, a intensidade é muito reduzida, tal como sucede com o ruído.

Neste campo, face às características iniciais da fonte, é igualmente possível analisar a sua forma de atenuação. Uma fonte pode ser pontual (trabalhador a usar um martelo pneumático) ou pode ser linear (estrada ou via férrea).

A fonte pontual, emite energia sonora com amplitudes bastante similares em todas as direções, sendo esta atenuada em função do afastamento em relação à fonte (6dB (A) por duplicação da distância entre a fonte e o recetor). (Figura 4.7.)

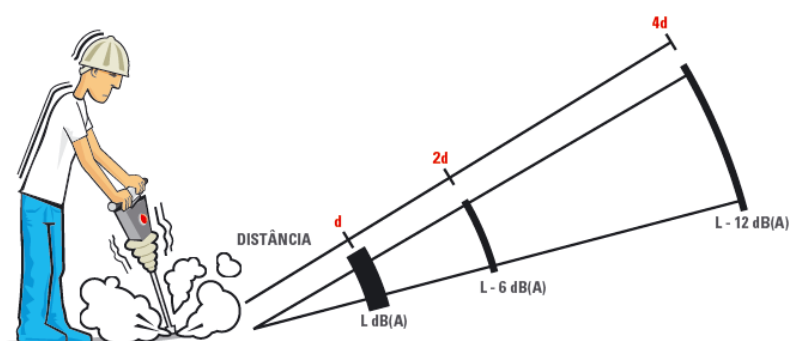


Figura 4.7 – Fonte de ruído pontual com esquema de atenuação [4]

No caso de uma fonte sonora linear, o ruído propaga-se em superfícies hemicilíndricas, tendo uma atenuação de 3 dB(A) por duplicação de distância à fonte sonora (Figura 4.8).

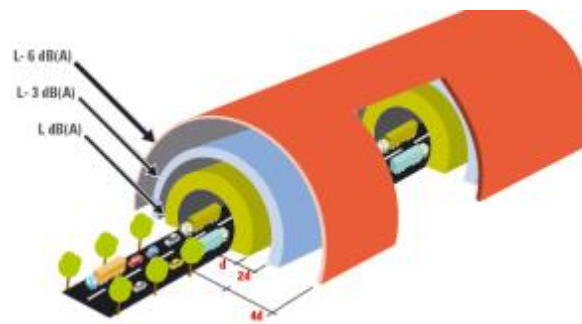


Figura 4.8 - Fonte de ruído linear com esquema de atenuação [4]

4.1.3 Medição do ruído

Segundo [4] o ruído não é estacionário, pelo que para caracterizar um tráfego rodoviário ou ferroviário uma medição instantânea se torna insuficiente. Para representar ou caracterizar este tipo de situações torna-se necessário obter um valor médio, associado a uma certa duração temporal.

Atualmente, o equipamento mais utilizado é o sonómetro, que permite obter indicadores de ruído instantâneos, médios, estatísticos e valores máximos e mínimos (Figura 4.9) [4].



Figura 4.9 – Indicadores fornecidos pelo sonómetro [4]



4.1.4 Organização espacial dos elementos por forma a minimizar o ruído

A organização espacial de uma cidade pode ter grande impacto ao nível do ruído. Por exemplo é desejável que os edifícios sejam projetados por forma a resguardar as zonas que carecem de mais tranquilidade.

No passado, para além da existência de um menor número de fontes de ruído, o mais usual era os edifícios de habitação serem projetados por forma a possuírem duas frentes. Em contrapartida, nos dias de hoje, o mais usual é que cada habitação tenha uma única frente associada, tornando-se assim impossível garantir tranquilidade a alguns dos apartamentos.

Na Figura 4.10, ilustra-se a situação referida anteriormente e onde é possível observar que as zonas de descanso como quartos e salas se devem situar na fachada oposta á zona ruidosa. No caso da existência de focos de ruído em várias direções existem outras soluções, tais como a criação de pátios interiores com alguma vegetação.

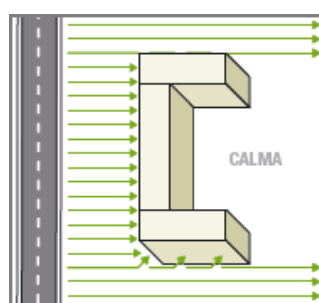


Figura 4.10 – Exemplo de minimização do ruído nas zonas sensíveis de um prédio habitacional [4]

4.2 Diferentes tipos de ruído associados à Via Férrea

Segundo a fonte [31], numa via férrea é possível identificar diferentes tipos de ruído, em particular:

- Ruído de rolamento;
- Ruído de tração;
- Ruído aerodinâmico;
- Ruído de equipamentos auxiliares;
- Ruído do pantógrafo;
- Ruído estrutural.

A velocidade é um dos fatores determinantes na forma de geração dos diferentes tipos de ruído. No gráfico da Figura 4.11 é possível verificar que o ruído aumenta com a velocidade, contudo consoante a velocidade praticada existe um ruído dominante associado.

Na mesma figura é possível verificar que para velocidades reduzidas, na ordem dos 80 km/h, o ruído de tração é dominante. Para velocidades entre os 85 km/h e os 105 km/h o ruído de rolamento assume o principal papel e para velocidades superiores aos 105 km/h o ruído aerodinâmico é dominante.

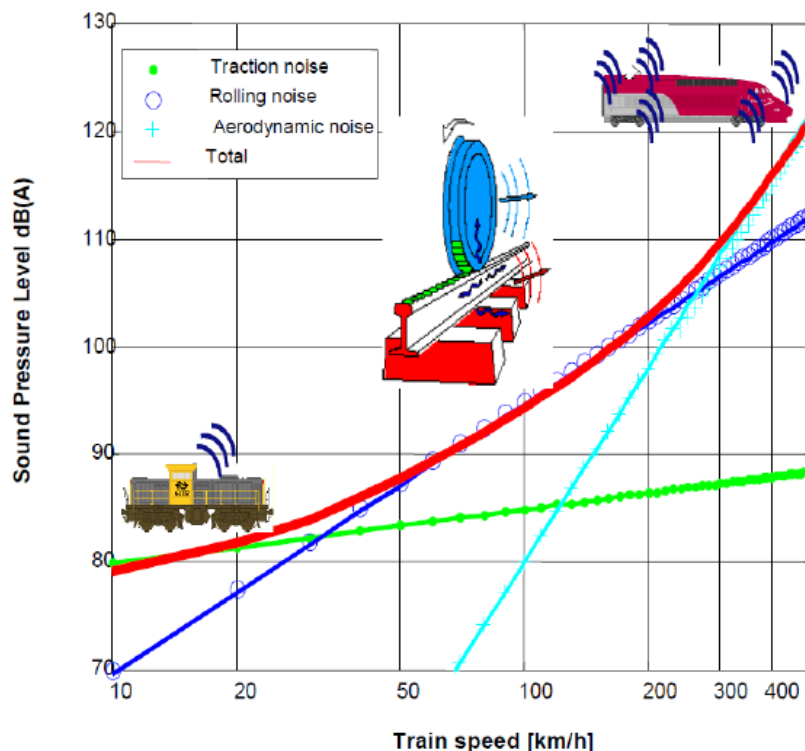


Figura 4.11 – Fontes de ruído de acordo com a velocidade da composição [12]

Tendo em conta que a velocidade é determinante na geração de ruído, é possível associar esta com o tipo de composição, torna-se assim possível determinar os principais componentes do ruído total nos mais diversos tipos de composições (Quadro 4.4).

Quadro 4.4 – Importância das fontes de geração de ruído [12]

ACTION	ROLLING NOISE	POWER EQUIPMENT NOISE	AERODYNAMIC NOISE
Freight trains	++	+	Not relevant
High speed trains	++	+	++
Intercity or other long distance trains	++	+	Not relevant
City railways (tram)	++	+	Not relevant



A análise dos ruídos inerentes à passagem de uma composição regra geral é normalizada. Inicialmente é audível o barulho dos equipamentos de tração e posteriormente e durante um período de tempo mais alargado é audível o ruído de rolamento, Figura 4.12.

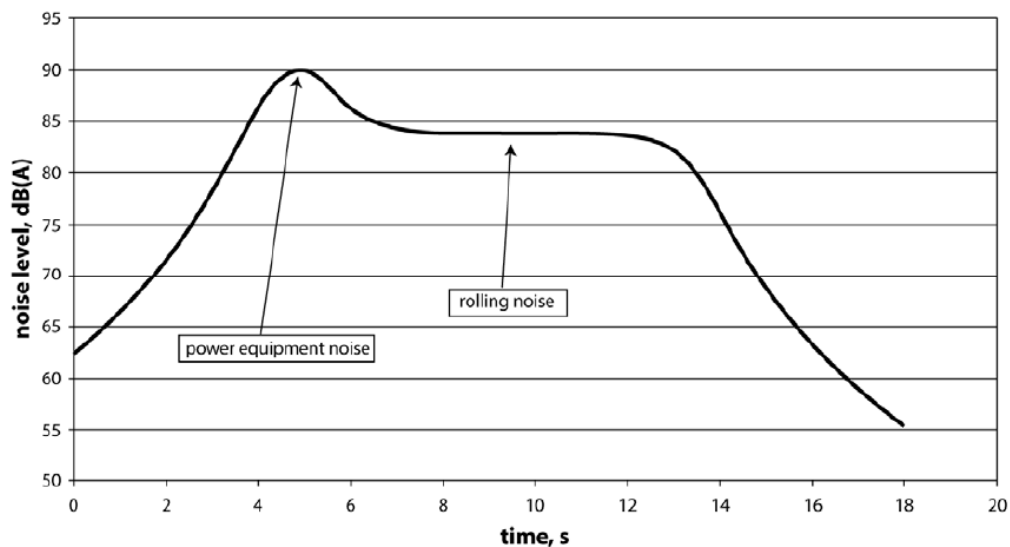


Figura 4.12 – Desenvolvimento da geração de ruído durante a passagem de uma composição [12]

Em seguida, de forma sintetizada, descrevem-se cada um destes ruídos.

4.2.1 Ruído de rolamento

Ruído associado à interação roda-carril, surge devido às imperfeições existentes nas superfícies destes dois elementos Figura 4.13. Este tipo de ruído contém um nível de energia bastante elevado, estando situado entre as bandas de frequência de 200 Hz e 5000Hz [18].

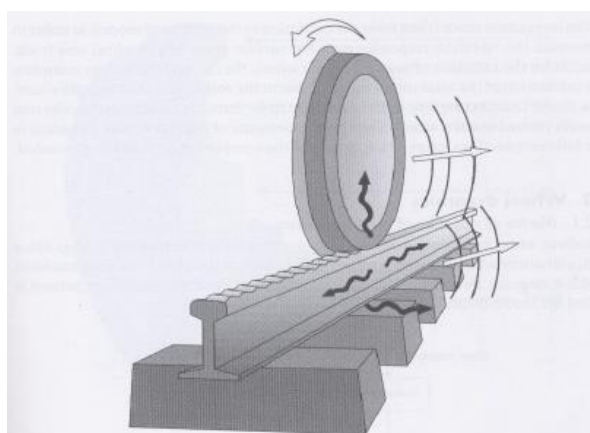


Figura 4.13 – Ruído de rolamento [18]



De acordo com a Figura 4.4 é possível verificar que segundo a curva de ponderação “A” o ruído é mais acentuado nas bandas de 1000 Hz e 2000Hz. Os valores de frequência associados à interação roda-carril encontram-se no intervalo crítico mencionado anteriormente.

4.2.2 Ruído de tração

O ruído de tração tem como fonte todos os mecanismos que fomentam o movimento dos comboios, nomeadamente motores e componentes.

Nos veículos com tração elétrica os valores são inferiores quando comparados com veículos de tração diesel.

4.2.3 Ruído aerodinâmico

A passagem do comboio origina um grande deslocamento de massa de ar sendo que este deslocamento provoca este tipo de ruído.

O ruído aerodinâmico tem impacto reduzido a baixas velocidades, contudo a velocidades na ordem dos 300 km/h torna-se dominante [18] [35]

4.2.4 Ruído dos equipamentos auxiliares

Ruído com origem nos diversos equipamentos auxiliares, nomeadamente em termos de segurança e conforto, enquadrando-se neste domínio o que resulta dos sistemas de climatização e frenagem.

4.2.5 Ruído do pantógrafo

O sistema de interação do pantógrafo com a catenária também induz alguma pressão sonora a todo o sistema. Nos veículos elétricos equipados com catenária (Figura 4.14), o fio de contacto mantém uma ligação permanente com o pantógrafo.

O fio de contato estabelece uma ligação com o pantógrafo através de um reposicionamento transversal do primeiro, por forma a que o contato abranja a quase totalidade do pantógrafo e não a sua zona central, o que conduziria a uma rotura do mesmo.



Figura 4.14 – Comboio com tração elétrica [22]

Nos veículos elétricos, onde a alimentação é feita pelo designado “3º. Carril”, como por exemplo no Metropolitano de Lisboa, esta componente também assume alguma importância, uma vez que também aqui existe um contacto/deslizamento entre o “patim” e o referido carril.

4.2.6 Ruído estrutural

Trata-se de uma radiação secundária, que surge através da vibração dos elementos de suporte da via. Esta vibração é estimulada através da passagem dos veículos, da interação roda-carril e ainda devido aos equipamentos de tração.

Geralmente o ruído estrutural não é gravoso. A exceção surge quando se trata de túneis ou viadutos, neste caso e principalmente em zonas residenciais, a existência deste tipo de ruído pode assumir valores e consequências preocupantes.

Caso exista um viaduto numa dada linha, o índice de ruído aéreo será incrementado pelo ruído estrutural. Assim as habitações localizadas a cotas superiores às da via são as mais afetadas, aumentando os impactos negativos com o passar dos anos (aumento das velocidades praticadas e do fluxo).

As vias assentes em laje de betão conferem uma proteção sonora acrescida face às estruturas mais aligeiradas, como por exemplo as metálicas. Contudo estas soluções são ineficazes em relação ao ruído estrutural, principalmente em pontos situados a cotas

inferiores à plataforma da via (Figura 4.15), sendo necessário adotar medidas complementares.

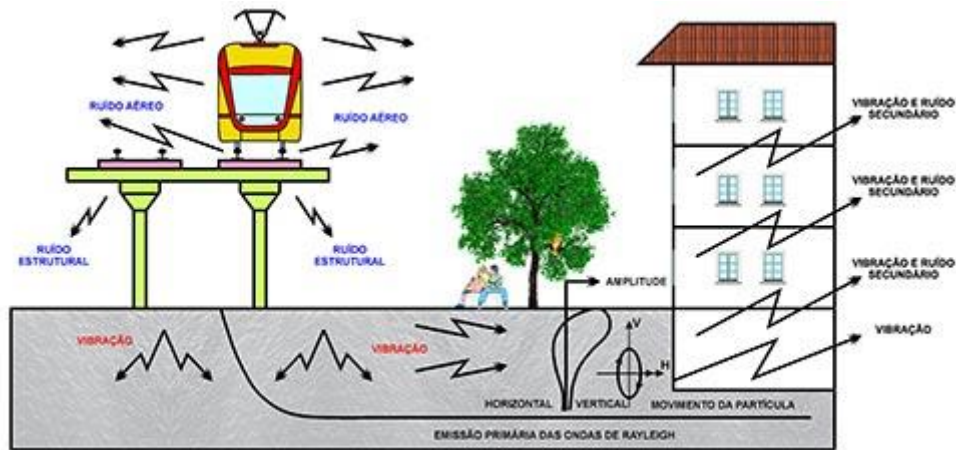


Figura 4.15 – Propagação do Ruído Estrutural [2]

Embora sem resultados práticos ao nível da mitigação do ruído estrutural, uma das medidas mais recorrentes consiste na colocação de barreiras acústicas (Figura 4.16).



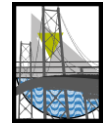
Figura 4.16 – Barreiras acústicas [29]

As barreiras acústicas são bastante úteis no combate do ruído de emissão direta, reduzem em cerca de 8 dB (A) o índice de ruído. Os custos associados à utilização deste tipo de solução rondam os valores explicitados no Quadro 4.5.

Quadro 4.5 – Custo de colocação de barreiras acústicas [12]

Altura (m)	Preço (€) por metro
2	1000 € / m
3	1350 € / m
4	1700 € / m

A utilização simultânea de barreiras acústicas e camadas de balastro, sendo que as segundas servem de amortecimento complementar à vibração na ordem dos 3 dB (A), geram reduções na ordem dos 10 aos 12 dB (A).



4.3 A vibração

A vibração, segundo (Sampaio, 2012) define-se como o movimento de um ponto ou sistema oscilando em torno de uma posição de referência (equilíbrio estático). A medição da vibração é realizada instante a instante, medindo-se a distância do ponto ao seu eixo de referência (amplitude).

Segundo o mesmo autor, todas as formas de vibração podem ser reduzidas à sua forma mais simples, nomeadamente a vibração harmónica, sendo todas as outras associações diversificadas desta mais simples.

Existem uma série de definições a ter em conta para ser possível caracterizar um fenómeno vibratório, tais como:

- Amplitude – afastamento máximo da partícula face ao seu eixo de equilíbrio;
- Frequência – número de movimentos completos (ciclos), por unidade de tempo (segundo), cuja unidade mais usual é o Hertz [Hz]¹⁵ [32];
- Fase – corresponde à posição inicial do ponto, no instante ($t=0$) em que se começou a medir, sendo medida em graus ou radianos.

Todas estas definições encontram-se esquematizadas na Figura 4.17.

¹⁵ A frequência também pode ser medida em RPM (rotações por minuto), em que 1 Hertz corresponde a 60 RPM.

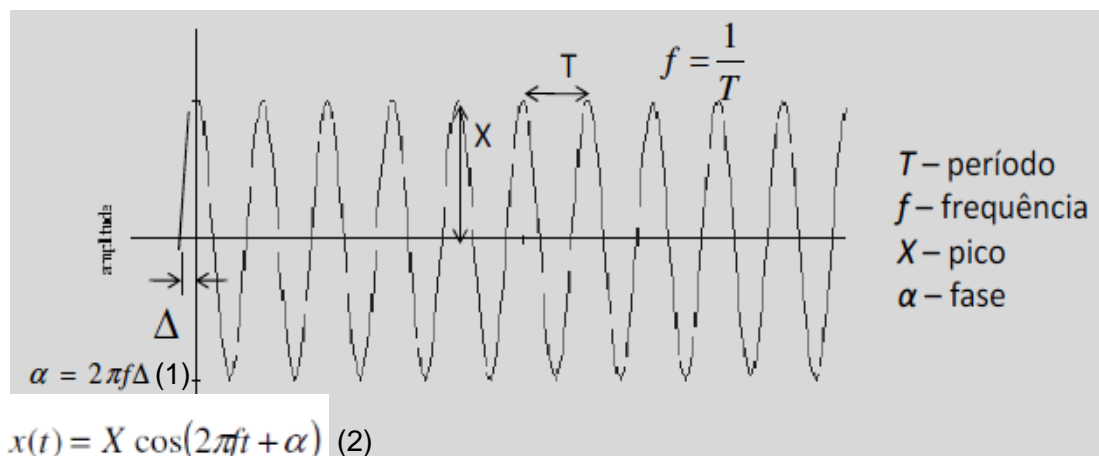


Figura 4.17 – Caracterização do movimento harmónico simples [32]

Uma característica importante igualmente a ter em conta é o fenómeno do amortecimento, caso contrário uma partícula permanecia eternamente em movimento. Em termos práticos o amortecimento é gerado com a dissipação de energia das ondas face à sua crescente distância do emissor, contudo este fator não é único, fatores como as características do material (teores em humidade, tipo de solo, etc) são também responsáveis pela dissipação das vibrações. [27]

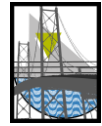
Segundo (Quesado, 2010), no âmbito da ferrovia existem diversos autores que defendem que a vibração do solo face à passagem de um comboio, principalmente a baixas frequências, deve-se não só à rigidez do eixo da roda, mas também a massa do veículo e à velocidade a que o mesmo se desloca.

O mesmo autor refere ainda que caso a velocidade de tráfego ultrapasse a velocidade de propagação das vibrações no solo, o impacto nas imediações poderá ser bastante gravoso.

Segundo [21], existem dois tipos de vibrações: as vibrações impulsivas e as vibrações continuadas.

As vibrações impulsivas são uma solicitação de curta duração, originadas por exemplo por explosões. As vibrações continuadas têm uma duração significativa, coexistindo com todos os elementos da envolvente.

No caso das vias férreas, as vibrações induzidas pela passagem dos veículos (Figura 4.18), podem ser classificadas no domínio das impulsivas, podendo no entanto, perante



elevadas frequências de passagens dos veículos assumir o carácter de vibrações continuadas.

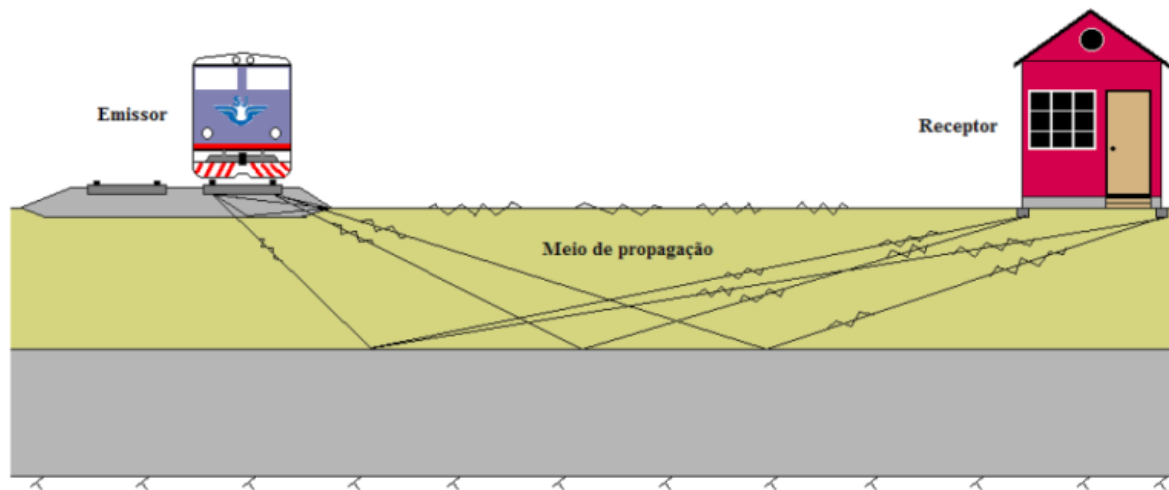


Figura 4.18 – Propagação das Vibrações [27]

Ainda de acordo com a mesma fonte existem 4 níveis de vibração sendo cada um associado a uma gama específica de frequências [17]:

- a) Vibração dos edifícios perceptível ao ser humano que esteja no interior do mesmo - 1 Hz a 80 Hz;
- b) Ruído gerado pela vibração das superfícies dos edifícios – 16 Hz a 250 Hz;
- c) Vibrações que danifiquem os edifícios – 1 Hz a 500 Hz;
- d) Vibrações que interferem com o bom funcionamento de serviços e/ou equipamentos – 1 Hz a 200 Hz.

Segundo (Quesado,2010), na generalidade a incomodidade das pessoas manifesta-se na existência simultânea de ruído e vibração.

4.3.1 Geração de vibrações

As vibrações geradas na Via Férrea advêm do campo de tensões gerado pelas cargas dos eixos dos comboios em movimento e a resposta da superestrutura e da fundação. Não sendo esta uma razão exclusiva no âmbito da geração de vibrações, no Quadro 4.6 estão identificados os fatores mais importantes para a geração de vibrações (Quesado, 2010).



Quadro 4.6 – Fatores importantes para a geração de vibrações [27]

Carris	Vibração na ligação rodados carris	Fundação	Ondas da resposta estrutural
Imperfeições	Oscilações do veículo em movimento	Travessas (espaçamento, rigidez, massa, geometria)	Carga por eixo
Espaçamento e intervalo entre juntas	Defeitos dos rodados	Balastro (rigidez, geometria e heterogeneidade)	Espaçamento e distribuição de cargas
Aparelhos de mudança de via	Acelerações e desacelerações	Solo de fundação	Velocidade
Curvas	Propriedades dinâmicas do bogie	-	-

Face aos diferentes tipos de fatores responsáveis pela geração de vibração, a cada qual corresponde um comprimento de onda diferente, Figura 4.19

$$f = \frac{c}{\lambda} \quad (3)$$

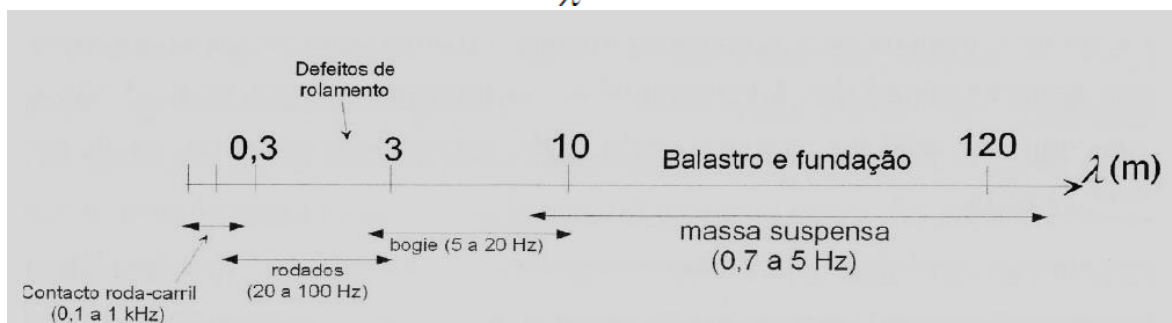


Figura 4.19 – Comprimentos de onda associados aos fenômenos de geração de vibração [27]

Em que:

f – Frequência de vibração (Hz)

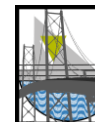
c – Velocidade de circulação do comboio (m/s)

λ - Comprimento de onda (m)

4.3.2 Propagação

De acordo com (Quesado, 2010), a propagação das vibrações depende de fatores como o tipo de onda (frequência, amplitude, etc.), não descurando as características geométrica e mecânicas dos materiais que são percorridos pela mesma.

A velocidade de propagação em determinado solo é determinada por:



$$V = \left(\frac{E}{\rho}\right)^{1/2} \quad (4)$$

Em que:

V – Velocidade de propagação em determinado solo

E – Elasticidade

ρ – Massa volúmica

Existem dois tipos de ondas geradas pela circulação dos comboios, as ondas volumétricas e as superficiais.

No âmbito das ondas volumétricas existem as ondas P e S, sendo as ondas P as detentoras de maior velocidade. No caso das ondas P estas são ondas compressão/dilatação, gerando uma variação de volume sem rotação das partículas do meio. As ondas S são ondas de cisalhamento, provocando ao longo do seu movimento uma rotação das partículas sem qualquer variação do volume

Quanto ao sentido de deslocamento das partículas, face ao movimento das diferentes ondas, é possível referir que no caso das ondas P o material vibra longitudinalmente/paralelamente ao sentido de deslocação da onda (Figura 4.20), assumindo alternadamente fenómenos de compressão e dilatação. No caso das ondas S o material vibra perpendicularmente (Figura 4.20) ao sentido de deslocamento da onda.

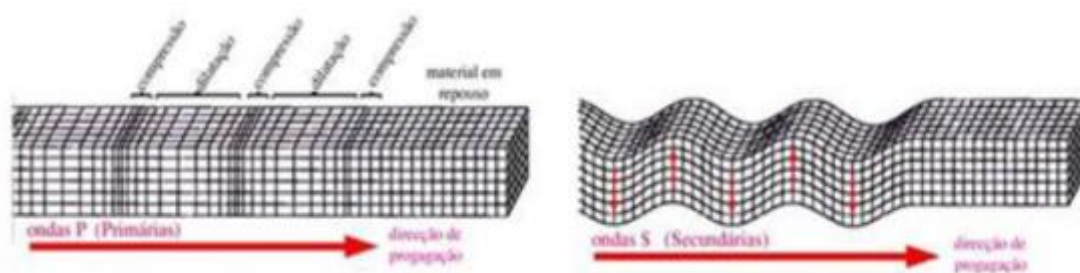
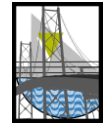


Figura 4.20 – Deformação do meio face a ondas volumétricas (P e S) [27]

As ondas de superfície assumem valores de velocidade muito reduzidos, em relação às ondas volumétricas, chegando a uma determinado ponto afastado do emissor muito depois das mencionadas. Estas são caracterizadas por possuírem uma grande amplitude aliada a uma baixa frequência e longa duração, estes fatores promovem um elevado grau de destruição.



Dentro deste tipo de ondas devem-se destacar as ondas R (Raylight) e L (Love). A diferença entre estes dois tipos reside nas características que deverá ter um solo de forma a proporcionar a sua propagação, sendo necessário um meio uniforme para as R e um meio não uniforme para as L.

As ondas R resultam da interferência entre as ondas volumétricas (P e S), descrevendo uma órbita elíptica no sentido contrário da propagação (Figura 4.21). No caso das ondas L, estas podem ser altamente destrutivas, tendo uma velocidade ligeiramente superior que as ondas R. Estas resultam da interferência de duas ondas S, proporcionando um deslocamento das partículas horizontal e transversal à direção do percurso da onda (Figura 4.21)

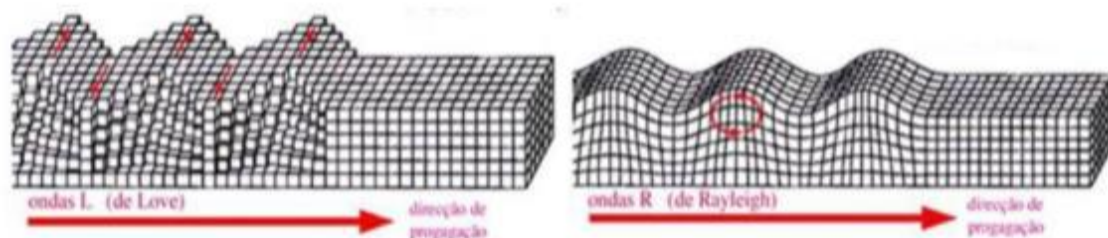


Figura 4.21 - Deformação do meio face a ondas superficiais (L e R) [27]



5. ENQUADRAMENTO LEGAL

5.1 Documentos legais

O presente capítulo foi elaborado com base nas fontes: [13] [14] [18] [21] [31].

A infraestrutura ferroviária é um elemento gerador de ruído de grande intensidade. Tendo como objetivo proteger a saúde humana e o bem-estar daqueles que se encontrem na envolvente de uma infraestrutura deste género, foi publicada legislação sobre esta matéria.

Os diplomas legais¹⁶ a ter conta para análise de ruído são:

- Decreto-Lei nº146/2006, de 31 de Julho – Avaliação e gestão do ruído ambiente;
- Decreto-Lei nº9/2007, de 17 de Janeiro – Regulamento Geral de Ruído (RGR).

No espaço europeu existe, a Diretiva 2002/49/EC monitoriza e estabelece parâmetros para o ruído ambiente, assentando esta nos seguintes objetivos:

- Monitorização;
- Informar e consultar a população;
- Abordar as autoridades locais para a implementação de medidas;
- Desenvolvimento de um plano a longo prazo para a redução de ruído.

Ainda de acordo com esta diretiva, todos os estados membros devem providenciar Mapas de ruído e planos de ação no âmbito da redução do ruído. Relativamente ao estado da implementação da Diretiva, Portugal já implementou totalmente as duas medidas solicitadas, nomeadamente através de:

1. Indicação dos índices de ruído e seus limites;
2. Elaboração de mapas estratégicos de ruído.

¹⁶ A nível Nacional



Em relação à documentação relacionada com a vibração associada à atuação de grandes infraestruturas de transporte, constata-se que a nível Nacional esta é escassa. Com efeito, embora sendo possível identificar regulamentação relacionada com a vibração, contudo esta encontra-se no âmbito das vibrações a que um ser humano se encontra exposto durante atividades laborais (Decreto-Lei nº 46/2006).

No espaço internacional a situação já se encontra mais controlada, existindo uma série de normas ISO. Dentro das normas ISO assumem destaque as seguintes:

- ISO 2631-1 e ISO 2631-3 – ambas relacionadas com a vibração e a afetação da mesma no ser humano;
- ISO 2631-2 - ação da vibração em edifícios;
- ISO 14837-1 – ruído e vibração provocados no solo pela existência de vias férreas.

O desenvolvimento deste capítulo incide essencialmente sobre toda a legislação associada ao ruído. No ponto 5.8, irá ser abordada de forma sucinta a metodologia utilizada para a avaliação da vibração.

5.2 Metodologia para a quantificação do indicador de ruído

O ruído provocado pela circulação ferroviária consiste numa atividade ruidosa permanente, pela definição dada no Decreto-Lei nº9/2007, de 17 de Janeiro. Salienta-se que o referido regulamento não se aplica a dispositivos de segurança do transporte ferroviário, nomeadamente passagens de nível.

No Decreto-Lei nº9/2007, de 17 de Janeiro, o valor do Indicador de Ruído associado ao incómodo geral é obtido a partir de (1)

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

Em que:

L_{den} – Indicador de ruído diurno-entardecer-noturno

L_d – Indicador de ruído diurno

L_e – Indicador de ruído entardecer

L_n – Indicador de ruído noturno



5.2.1 Períodos horários

Os períodos horários para as fases mencionadas na fórmula do cálculo do Indicador de Ruído, encontram-se distribuídos na forma apresentada na Figura 5.1.



Figura 5.1 – Períodos horários

5.2.2 Caracterização das zonas em estudo

A verificação da adequabilidade de um determinado índice de ruído face aos critérios impostos na legislação, tem por análise a zona em causa. As zonas podem ser de dois tipos, conforme consta no Quadro 5.1.

Quadro 5.1 - Caracterização dos diferentes tipos de zona de análise face à exposição ao ruído

Zona sensível	Zona vocacionada para uso habitacional, escolas, hospitais e edifícios com propósitos similares. Pode existir pequeno comércio, sem funcionamento durante o período noturno, desde que este seja para o uso da população local.
Zona mista	Zona que acarreta todas as especificações não contempladas na definição de zona sensível.

A delimitação do território nas referidas zonas, é da responsabilidade exclusiva dos municípios, tendo estes igualmente a responsabilidade de visionar o possível crescimento do município e elaborar mapas de ruído, por forma a que estes sustentem com coerência a elaboração, alteração e revisão dos Planos Diretores Municipais (PDM) e Planos de Urbanização (PU). Os dados acústicos para a análise do ruído podem ser obtidos da seguinte forma:

- Técnicas de modelação apropriadas;
- Recolha de acordo com técnicas de medição apropriadas.



5.3 Regras para a realização das medições acústicas

As medições acústicas devem ser realizadas no recetor sensível (por exemplo num edifício) ou junto do mesmo (na rua adjacente) através das seguintes formas:

- Afastadas 3,5 m de qualquer estrutura refletora, a uma altura preferencial de 3,8 m a 4,2 m em relação ao solo se possível. Em caso de impossibilidade de obtenção da altura anterior é admissível uma altura entre os 1,2 m e 1,5 m. No caso de não ser possível garantir o afastamento de 3,5 m de elementos refletores o valor final deve ser corrigido, regra geral é aplicada uma correção de -3 dB (A);
- Análise de mapas de ruído existentes.

O município tem como função crucial intervir nas zonas onde os níveis de ruído sejam superiores aos valores admissíveis. É igualmente da responsabilidade dos municípios a elaboração de Planos Municipais de Ruído de acordo com as disposições impostas no Decreto-Lei nº146/2006, de 31 de Julho.

5.4 Mapas de ruído e Planos de redução de ruído

No âmbito das infraestruturas de transportes existem dois documentos cujas definições devem ser consideradas:

- Mapas de Ruído;
- Planos de Redução de Ruído.

Um Mapa de Ruído é um mapa que permite ter uma perceção do ruído exterior, de uma ou mais fontes, de uma determinada zona, atribuindo vários níveis de intensidade com o auxílio de uma escala cromática.

Os Planos de Redução de Ruído têm como objetivo a gestão do ruído, tentando desta forma minimizar os problemas resultantes do mesmo.

A responsabilidade de elaboração dos Mapas de Ruído e dos planos de Redução de Ruído, é totalmente descartada das obrigações dos municípios quando se entra no âmbito das grandes infraestruturas de transporte ferroviário, pelo que a elaboração destes dois documentos cabe à entidade gestora da infraestrutura de transporte, sendo estes passíveis de aprovação por parte da Agência Portuguesa do Ambiente (APA).



A elaboração destes dois documentos é crucial para se conseguir obter uma boa interação da infraestrutura de transporte com a envolvente. No Quadro 5.2 e no Quadro 5.3, estão mencionados os requisitos mínimos para a elaboração de cada dos documentos, em conformidade com o Decreto-Lei nº146/2006, de 31 de Julho.

Quadro 5.2 – Requisitos Mínimos para os Mapas de Ruído

Requisitos Mínimos	<ul style="list-style-type: none">• Situação acústica existente;• Situação acústica prevista;• Ultrapassagem dos valores limite, estabelecidos no Decreto-Lei nº9/2007, de 17 de Janeiro;• Nº estimado de edifícios, de habitação ou de serviços, expostos a determinado índice de ruído;• Nº estimado de pessoas localizadas numa zona exposta ao ruído
---------------------------	--

Quadro 5.3 – Requisitos Mínimos para os Planos de Redução de Ruído

Requisitos Mínimos	<ul style="list-style-type: none">• Enquadramento jurídico;• Valores-limite existentes no RGR;• Descrição da envolvente, desde as aglomerações às infraestruturas de transporte;• Identificação da entidade competente na elaboração do plano;• Identificação das entidades competentes responsáveis por medidas já em vigor;• Resumo de dados que deram origem à necessidade de elaboração do plano;• Número estimado de pessoas expostas ao ruído;• Identificação das situações e problemas que carecem de resolução;• Identificação das medidas de redução já em vigor e projetos em curso;• Por forma a preservar as zonas tranquilas, a entidade competente deve incluir ações de preservação dessas zonas, para o período dos 5 anos seguintes;• Estratégia a longo prazo;• Informações de cariz financeiro,• Medidas previstas para a avaliação da implementação do plano de ação e dos seus resultados.
---------------------------	---

5.5 Valores limite de exposição

Os valores limite de exposição ao ruído diferem mediante o tipo de zona em causa, zona mista ou sensível. No decreto-lei nº9/2007 de 17 de Janeiro, o artigo 11º indica os limites a ser respeitados, conforme indica o Quadro 5.4.



Quadro 5.4 – Valores Limite de Exposição ao Ruído

	Zonas mistas	Zonas sensíveis
L_{den}	65 dB (A)	55 dB (A)
L_n	55 dB (A)	45 dB (A)

5.6 Hierarquização das medidas mitigadoras

As medidas mitigadoras que constam no Plano Municipal de Ruído, podem ser executadas de forma faseada, dando prioridade às zonas (mistas ou sensíveis) cujo índice exceda os limites legais em 5 dB (A).

No âmbito da aplicação das medidas de mitigação é considerada uma hierarquia a ter em conta, conforme se pode constatar na Figura 5.2.

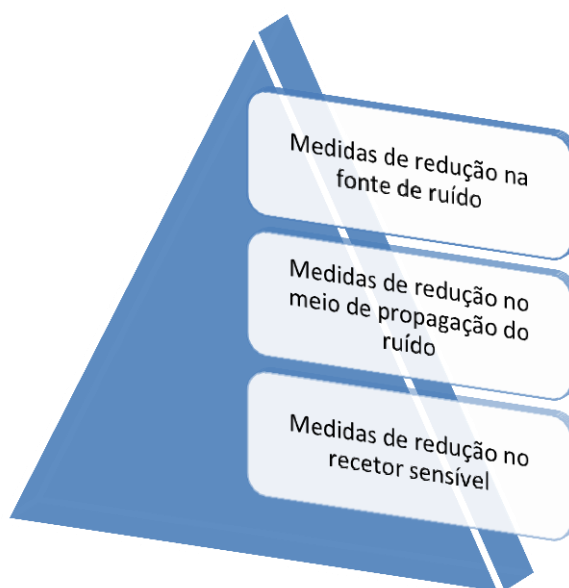


Figura 5.2 – Hierarquização das medidas de ação

A aplicação das medidas no recetor sensível é uma ação de última instância. Apenas se atua diretamente neste tipo de recetor, se todas as outras opções não produzirem os efeitos redutores esperados.

Face ao exposto anteriormente e desde que o valor não exceda os 5 dB (A), torna-se possível atuar no recetor sensível. As medidas implementadas no recetor sensível são financiadas pela entidade responsável que possuir o título de licença mais recente.



5.7 Valor limite para zonas sensíveis expostas ao ruído de uma grande infraestrutura rodoviária

No Decreto-Lei nº9/2007, de 17 de Janeiro, constam no artigo 19º, os valores limite para as zonas sensíveis expostas ao ruído de uma grande infraestrutura rodoviária. Os valores que constam neste artigo são diferentes dos citados anteriormente (Quadro 5.4 – Valores Limite de Exposição ao Ruído), atribuindo valores limite de exposição diferentes face à situação da infraestrutura de transporte à data de entrada do Regulamento Geral de Ruído.

À data de entrada do RGR, uma infraestrutura de transporte pode já estar numa de exploração ou em fase de projeto, sendo que os limites preconizados são diferentes conforme se pode observar no Quadro 5.5.

Quadro 5.5 – Valores Limite para Zonas Sensíveis expostas ao ruído de uma grande infraestrutura

	Fase de exploração	Fase de projeto	
		Infraestrutura de transporte aéreo	Infraestrutura de transporte não aéreo
L_{den}	65 dB (A)	65 dB (A)	60 dB (A)
L_n	55 dB (A)	55 dB (A)	50 dB (A)

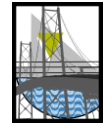
5.8 Vibração - Critérios de admissibilidade

Segundo [32], enquanto não existirem normas portuguesas aplicáveis, o LNEC tem utilizado os seguintes critérios de admissibilidade para a velocidade de vibração (v_{ef} – velocidade efetiva da vibração):

- Incomodidade para os seres humanos (Quadro 5.6)

Quadro 5.6 -Valores limite de velocidade de vibração para a incomodidade percebida por pessoas [32]

v_{ef} (mm/s)	sensação
$v_{ef} < 0,11$	nula
$0,11 < v_{ef} < 0,28$	perceptível, suportável para pequena duração
$0,28 < v_{ef} < 1,10$	nítida, incómoda, podendo afectar as condições de trabalho
$1,10 < v_{ef}$	muito nítida, muito incómoda, reduzindo as condições de trabalho



b) Danos em estruturas (Quadro 5.7)

Quadro 5.7 – Valores Limite de Velocidade de Vibração para danos em estruturas [32]

v_{ef} (mm/s)	efeitos
$v_{ef} < 3,5$	praticamente nulos
$3,5 < v_{ef} < 7$	possibilidade de danos cosméticos em edifícios antigos
$7 < v_{ef} < 21$	fendilhação ligeira nos revestimentos
$21 < v_{ef} < 42$	fendilhação acentuada nos revestimentos e alvenarias
$42 < v_{ef}$	danos consideráveis; possível fendilhação da estrutura de betão armado

No âmbito dos equipamentos sensíveis, os parâmetros de admissão devem ser definidos pelo fabricante. [32]

De acordo com a mesma fonte, em relação ao ruído estrutural, o LNEC tem utilizado o critério de $V_{ef} < 0,03$ mm/s, que assegurará geralmente a não emissão pelo elemento vibrante de ruído superior a 40 dB(A).

A todos os valores de limite deve ser associado um fator corretivo tendo por base o tipo de local e o período horário. Os valores encontram-se no Quadro 5.8.

Quadro 5.8 – Valores Corretivos de V_{ef} [32]

Local	Período	Vibração continuada ou intermitente	Vibração impulsiva, várias ocorr. ^s /dia
locais muito sensíveis	dia ou noite	1	1
habitação	dia	2 a 4	30 a 90
habitação	noite	1,4	1,4 a 20
escritório	dia ou noite	4	60 a 128
oficina	dia ou noite	8	90 a 128



6. MEDIDAS MITIGADORAS PARA O RUÍDO E VIBRAÇÃO

Por forma a minimizar os efeitos do ruído e vibração provocados pelas vias férreas nas zonas habitadas/ocupadas por seres humanos, tentando desta forma harmonizar a coexistência de ambas as partes, têm sido estudadas e implementadas diversas soluções.

A aplicação deste tipo de medidas tem inevitavelmente que ter em conta a posição dos carris, nomeadamente no que se refere ao seu contacto com a envolvente (expostos ou embebidos).

Devem igualmente ter-se em atenção os aspetos inerentes à metodologia construtiva da infraestrutura, pelo que se considerou desejável explicitar as soluções para as vias assentes em balastro e para as assentes em lajes de betão.

As soluções descritas no presente capítulo têm como suporte principal a fonte [06].

6.1 Vias expostas

Para este tipo de vias, em particular as vias balastradas ou vias assentes sobre lajes de betão, em que o carril está saliente, é usual considerar 3 níveis de intervenção.

6.1.1 Nível de intervenção 1

O primeiro nível de intervenção localiza-se entre o carril e as travessas, conforme a Figura 6.1.



Figura 6.1 – Localização do 1º nível de intervenção [6]

A disposição do material usado neste nível de intervenção difere das vias balastradas para as vias assentes em laje de betão. No caso das vias balastradas a metodologia passa pela aplicação de palmilhas entre o carril e a travessa (Figura 6.2).



No caso das vias assentes em betão, a aplicação é geralmente efetuada de forma mais contínua, recorrendo à colocação de uma “tira” sob o carril para permitir o seu isolamento com a laje de betão (Figura 6.3).

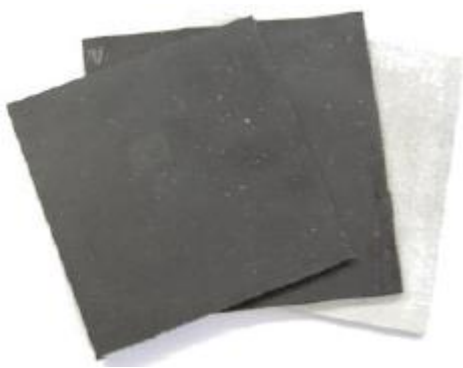


Figura 6.2 – Palmilhas de carril, aplicação na via balastrada ou betonada [6]



Figura 6.3 – Tira para carril, aplicação na via assente em laje [6]

Vantagens deste tipo de solução:

- Redução da vibração ao nível da zona de suporte da via ferroviária (nas travessas e balastro no caso das vias balastradas) bem como nas vias assentes na própria laje. A redução situa-se entre os 3 dB e os 10 dB, estando esta dependente da rigidez das palmilhas colocadas [6];
- Aumento da duração do tempo de vida útil das travessas e do carril;
- Adaptáveis a qualquer tipo de carril, travessas e sistema de fixação;
- Evitar/reduzir a ondulação do carril no caso das vias assentes em laje suportadas de forma contínua.

6.1.2 Nível de intervenção 2

Dadas as diferentes metodologias construtivas entre as vias balastradas e as vias assentes em laje de betão, considerou-se desejável considerar este nível de intervenção de forma independente.



Vias balastradas

O segundo nível de intervenção nas vias balastradas situa-se entre as travessas e a superfície de contacto da infraestrutura, (Figura 6.4).



Figura 6.4 - Localização do 2º nível de intervenção em vias balastradas [6]

Esta intervenção pode ser realizada tanto em travessas de madeira como de betão, sendo que a aplicação passa pela colocação de uma palmilha ao longo de toda a extensão das travessas (Figura 6.5).



Figura 6.5 – 2º Nível de intervenção em vias balastradas [6]

Vantagens desta solução:

- Proteção do balastro e do subsolo;
- Aumento da vida útil dos componentes da Via Férrea;
- Retardamento do surgimento dos fenómenos de ondulação no carril, reduzindo a necessidade de manutenção na via;
- Redução dos índices de ruído em valores superiores a 10-15 dB [6];
- Atenuação, em zonas costeiras e desérticas, da intrusão da areia para a plataforma.



Vias assentes em laje de betão

No caso das vias assentes em laje de betão existem duas metodologias a ter em conta. Embora a zona de intervenção seja ao nível da travessa, a mesma contempla duas partes distintas, concretamente associada aos elementos de fixação ou à alteração física da travessa tradicional.

a) Palmilha na base da fixação ou fixação com palmilha incorporada

Neste caso, o material encontra-se entre a travessa e o material de fixação. A rigidez e a espessura da palmilha são variáveis, dependendo dos índices de redução que se pretenda. Obtém-se assim a agregação da palmilha à fixação da travessa, (Figura 6.6), e o caso das fixações com palmilha incorporada (Figura 6.7)

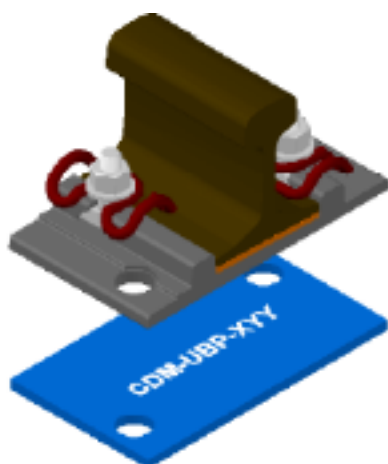


Figura 6.6 – Palmilha na base da fixação [6]

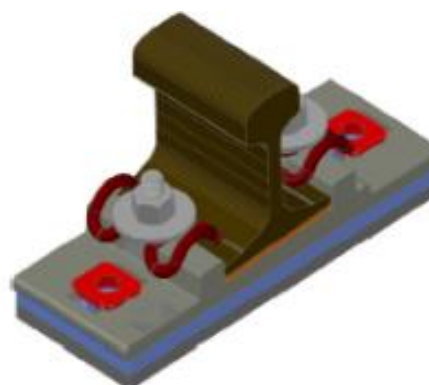


Figura 6.7 – Material de fixação com palmilha incorporada [6]

Salienta-se que em ambos os casos é possível, para atenuar de forma mais abrupta os níveis de ruído, associar outro nível de redução, o que pode passar pela colocação de uma palmilha na zona de contacto entre o carril e a fixação. Esta metodologia apresenta as seguintes vantagens:

- Redução na ordem dos 10 dB a 12 dB [6];
- Adaptável a qualquer tipo de carril;
- Aumento da vida do carril e da laje.



b) Travessas com materiais elastómeros

Este tipo de travessa (não tradicional) incorpora um material elastómero que inibe os índices de vibração. A composição da mesma é em betão, tendo no entanto um peso muito mais reduzido em relação às travessas tradicionais. A colocação das camadas de betão e material elastómero é feita de forma alternada (Figura 6.8).

Com esta solução, o peso total da via é obviamente aligeirado, sendo também o processo de substituição de um destes elementos mais fácil e rápido.



Figura 6.8 – Travessas com material elastómero [15]

6.1.3 Nível de intervenção 3

Existe por fim um nível de intervenção que é muito mais invasivo que os explicados anteriormente. A intervenção localiza-se entre a camada inferior da infraestrutura, balastro ou laje, e o terreno natural, de acordo com a Figura 6.9.



Figura 6.9 - Localização do 3º nível de intervenção [6]

No caso das vias balastradas, regra geral, a solução passa pela colocação de uma manta de balastro, assente de forma contínua ao longo de toda a via, conforme a Figura 6.10. Após aplicação deste tipo de solução a sensação com que se fica é que foi acrescentada uma nova camada à infraestrutura da via, Figura 6.11.



Figura 6.10 – Colocação de uma manta de balastro em via balastrada [6]



Figura 6.11 – Pormenor da disposição das camadas após aplicação da camada absorvente em via balastrada [6]

No caso das vias assentes em laje de betão são admitidas três variantes.

- a) O primeiro caso é similar à manta contínua das vias balastradas, contudo neste caso a mesma estende-se às laterais da plataforma Figura 6.12.

Esta necessidade surge na medida em que sendo a laje de betão um material bastante rígido e estando em contato com as delimitações da plataforma, a interação entre as mesmas irá produzir grandes índices de vibração e ruído, sendo assim necessário, para minimizar estes efeitos, criar uma fronteira entre as mesmas.



Figura 6.12 – Colocação de uma manta de borracha contínua em via assente em laje [6]



- b) O segundo caso consiste na utilização descontínua do material de isolamento, sendo os mesmos colocados em zonas específicas, onde é necessário assegurar uma efetiva redução de ruído e vibrações (Figura 6.13).

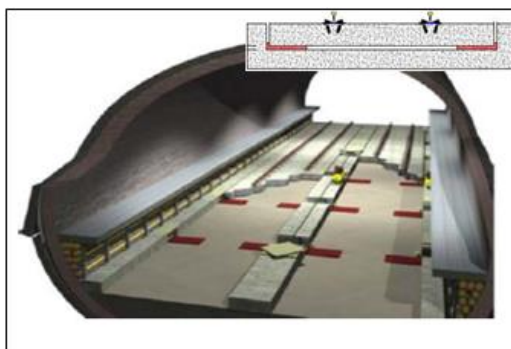


Figura 6.13 - Colocação de uma manta de borracha descontínua em via assente em laje [6]

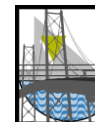
- c) A última solução traduz-se na colocação, em contínuo, ao longo de toda a via, de placas com apoios elastómeros discretos associados Figura 6.14.



Figura 6.14 – Colocação de uma camada de placas com apoios discretos [6]

Benefícios da aplicação desta nova camada, contínua ou descontínua:

- Redução do valor das frequências de ruído e grande capacidade de isolamento da vibração, 15-25 dB;
- Redução da espessura da camada de balastro, no caso das vias;
- Manutenção mais reduzida;
- Aumenta a vida útil de todos os componentes associados à via férrea;
- Facilidade na instalação e na aplicação;
- Os tapetes de borracha são permeáveis e resistentes à água e a outros produtos químicos.



6.2 Via embebida

No caso das vias embebidas, as zonas passíveis de alteração são altamente restringidas. Esta situação surge pelo fato do carril e todos os acessórios se encontrarem completamente inseridos no pavimento, estando este linearizado com todo o pavimento adjacente.

Nesta situação, a metodologia para a aplicação de materiais que inibam o ruído e a vibração proveniente deste tipo de vias, traduz-se numa intervenção, com várias variantes, ao nível do carril (Figura 6.15).



Figura 6.15 – Intervenção em vias embebidas [6]

As medidas implementadas para reduzir o ruído e a vibração passam por 2 metodologias construtivas distintas.

- a) A primeira solução consiste na criação de toda uma estrutura da Via Férrea mediante a colocação inicial do carril já com a peça elastómera agregada (Figura 6.16). Por forma a garantir o correto nivelamento e alinhamento da via, são colocadas peças niveladoras de 3 em 3 metros, (em curva este espaçamento é encurtado). A betonagem da laje será feita após o posicionamento de todos os elementos constituintes da via.

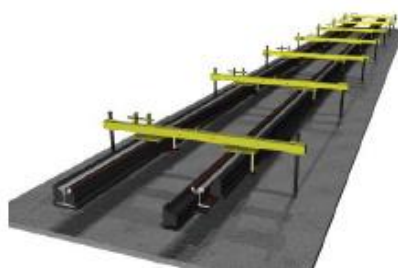


Figura 6.16 - Via Férrea embebida silenciosa [6]

Nesta metodologia pode ainda enquadrar-se a denominada “Via Férrea embebida flexível”, (Figura 6.17), que contempla a existência de travessas e onde a superfície de apoio do carril pode ser contínua, descontínua ou quase contínua.

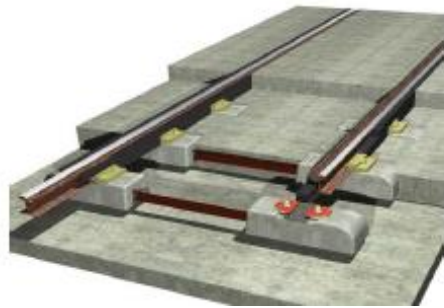
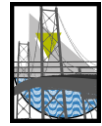


Figura 6.17 – Via Férrea embebida flexível [6]

Por último no caso da Via Férrea embebida em que o elastómero é derramado, (Figura 61 e Figura 62), o material elastómero é derramado por forma a isolar todo o carril da laje de betão, sendo que o carril fica apoiado de forma contínua.



Figura 6.18 – Via férrea embebida apoiada continuamente [15]

Vantagens das soluções, independentemente da metodologia construtiva:

- Fixação dos carris;
- Isolamento elétrico;
- Redução dos níveis de vibração;
- Potencia a estabilidade final entre a estrada e a Via Férrea;
- Redução da espessura da Via Férrea;
- Permite a transferência de cargas de um meio para outro;
- Dissocia o carril do seu próprio ambiente.



6.3 Outras medidas

Na atualidade, constata-se a existência de uma vasta gama de soluções, com diferentes tecnologias e níveis de intervenção.

As soluções apresentadas em seguida, maioritariamente suportadas em [12], têm por base uma inibição direta na fonte de emissão de ruído ou vibração, destacando-se:

- Ações ao nível da roda;
- Ações ao nível do carril;
- Ações no âmbito da alta velocidade;
- Ações para diminuição de picos de ruído (“squeal noise”).

6.3.1 Ações ao nível da roda

Em complemento a metodologias para minimizar o ruído de rolamento, têm igualmente surgido ações envolvendo outras fontes de ruído, em particular ao nível da frenagem e do consequente desgaste que esta induz no carril.

Na figura seguinte é possível visualizar dois tipos de sistemas de travagem, à esquerda os travões de calço e à direita travões de disco.

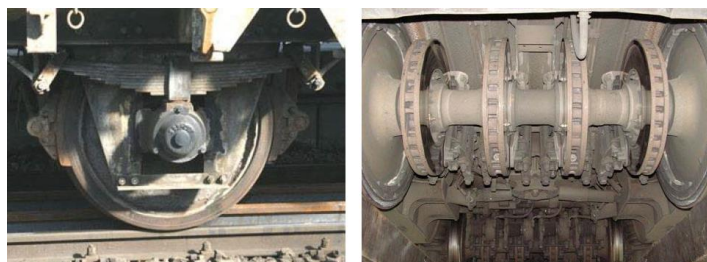


Figura 6.19 – Travões de Calços e de Disco [12]

No caso dos travões de calços, a travagem é realizada através de blocos de travagem que atuam de forma direta na roda e em função dos materiais em presença é geradora de ruído. No caso dos travões de disco, o processo de travagem é bastante mais silencioso, pois é realizado de forma indireta na roda, mais concretamente através de um mecanismo de roda dentada que executa o bloqueio do sistema. Este segundo sistema é



em média mais silencioso em cerca de 8 dB (A), contudo é bastante mais dispendioso¹⁷.

Outra forma de agir diretamente sobre a roda passa pela alteração morfológica da mesma, designadamente através da sua perfuração, sendo que no entanto, segundo [12] esta medida têm-se mostrado pouco eficiente.

Apresentam-se em seguida algumas soluções que têm sido implementadas, embora algumas ainda estejam em fase experimental:

- Colocação de anéis amortecedores na roda (Figura 6.20)

Este tipo de solução confere uma redução na ordem dos 6 dB (A)¹⁸.

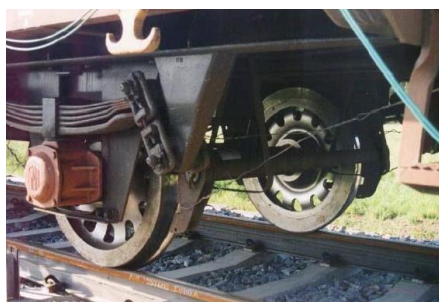


Figura 6.20 – Roda com anéis amortecedores e furações [12]

- Colocação de anéis absorventes no interior da roda

Reduções até aos 7 dB (A) [14], contudo apresenta um custo elevado (entre os 3000€ e os 8000€).



Figura 6.21 – Roda com anéis absorventes [12]

¹⁷ Existe ainda a possibilidade de substituir os blocos de travagem de ferro fundido por blocos constituídos por materiais compósitos.

¹⁸ Valores de acordo com fonte [14].



- Colocação de escudos protetores nas rodas

Reduções superiores a 9 dB (A) [14].



Figura 6.22 – Roda com o escudo protetor integrado [12]

A redução do diâmetro da roda foi um aspeto tido em conta, contudo o mesmo não produziu os resultados desejados. A diminuição do diâmetro da roda em vez de reduzir o nível de ruído atua no sentido contrário, incrementando o mesmo em resultado de uma maior interação entre a roda e o carril.

Outra solução apresentada pela Rona, a Alu4 (Figura 6.23), consiste na criação de uma roda cujo interior, em alumínio, complementada com a colocação de amortecedores. A colocação do alumínio reduz o peso da roda, principal condicionante durante a interação roda carril e igualmente com responsabilidade nas irregularidades produzidas no carril.

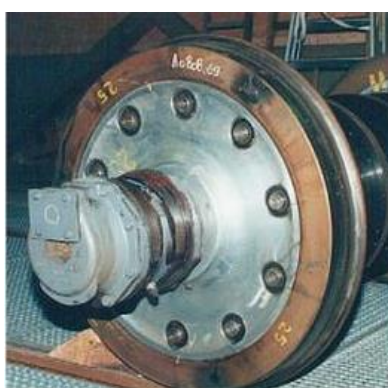


Figura 6.23 – Roda projetada pela Rona, Alu4 [35]

Soluções como a Alu4, ou seja soluções que apresentam a utilização de vários tipos de materiais, promovem, segundo [14], um decréscimo do índice de ruído em cerca de 12 dB (A). Após um descarrilamento em Eschede na Alemanha, em 1998, a utilização deste tipo de rodas foi fortemente censurada pela indústria e deixou de ser considerada para a Alta Velocidade.



6.3.2 Ações ao nível do carril

As ações ao nível do carril são as mais diversas, sendo que uma das mais desenvolvidas assenta na utilização de amortecedores de carril (Rail dampers). A UE durante o desenvolvimento do projeto “Silent track” desenvolveu este conceito, que este consiste no revestimento lateral do carril por material com níveis elevados de absorção (por exemplo cortiça).

Empresas como a Tata Steel ou Vossloh desenvolveram sistemas onde é possível “agregar” este tipo de solução a carris (não embebidos) que estejam em funcionamento (Figura 6.24). Este tipo de solução confere atenuações na ordem dos 3 a 7 dB (A), os preços oscilam entre os 300 e 400€ por metro e já estão instalados em mais de 200 km de linha.



Figura 6.24 – “Rail dampers” [40]

6.3.3 Ações no âmbito da Alta Velocidade

Tal como foi referido anteriormente o ruído aerodinâmico assume o papel principal na Alta Velocidade sendo que, quanto maior for a velocidade maior será o ruído produzido.

Durante a passagem de um comboio de Alta Velocidade é comum associar o ruído à passagem abrupta da composição, facto que não é totalmente verdade uma vez que outros equipamentos são igualmente geradores de ruído, como é o caso do pantógrafo na sua interação com a catenária.

A produção de ruído por parte do pantógrafo torna-se significativa, na medida em que o mesmo se situa mais elevado que as barreiras acústicas. Ações de intervenção no pantógrafo, tais como revestimento do sistema (Figura 6.25), conferem atenuações na ordem dos 5 a 10 dB (A) [12].

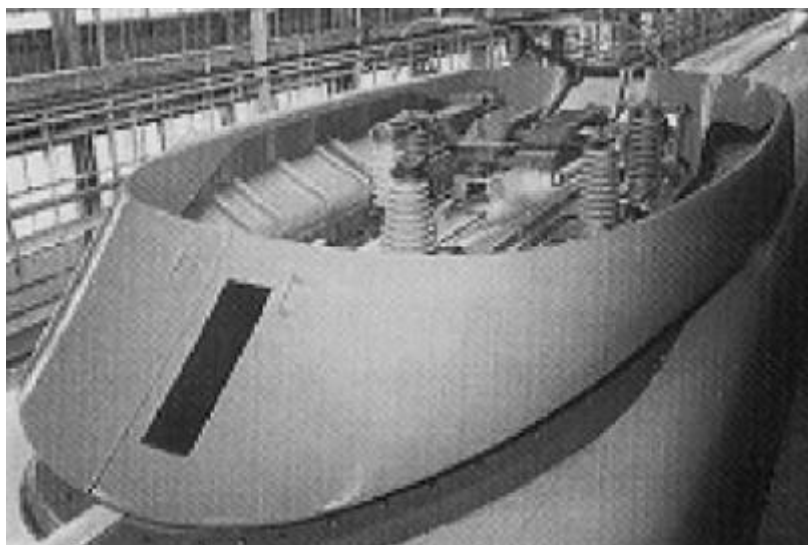


Figura 6.25 – Exemplo de revestimento do pantógrafo (Japanese Shinkasen Series 700) [12]

6.3.4 Ações para diminuição de picos de ruído (“squeal noise”)

Durante o percurso das composições, a existência de picos de ruído ocorre quando as composições descrevem uma curva, sendo que este ruído surge devido à fricção entre a roda e o carril.

Foram disponibilizadas várias soluções com o intuito de diminuir estes picos de ruído, e que podem passar, para além do amortecimento em rodas e carris, por modificadores das condições de fricção, os quais alteram o modo de interação entre a roda e o carril.

Este tipo de solução é incorporado através do recurso a lubrificantes, sendo estes aplicados diretamente na face de guiamento lateral mais elevada uma vez que a colocação no topo do carril não é de todo desejável¹⁹.

Outra alternativa passa pela adoção, nas zonas de curva, de um carril assimétrico, diminuído assim o efeito de “squeal noise”. As soluções disponíveis permitem reduções do nível de ruído superiores a 20 dB (A) [14].

¹⁹ Não é desejada na medida em que durante a tração (aceleração e travagem), são necessários elevados níveis de fricção.



6.4 Constituição dos materiais usados

Regra geral as soluções descritas anteriormente incorporam:

- Resinas com grânulos de borracha de diferentes elasticidades;
- Grânulos de cortiça e borracha;
- Espuma de poliuretano.

Os elementos usados nos níveis de intervenção referidos, para além de permitirem a obtenção de resultados ao nível da redução de ruído e vibrações têm igualmente uma componente ecológica, uma vez que, em grande parte destes, são incorporados materiais que sendo considerados detritos (por exemplo pneus), irão ser objecto de uma reutilização u reciclagem.

Segundo [39] existem 4 destinos para um pneu usado:

- Reutilização – utilização do pneu sem qualquer fase de processamento, para o mesmo fim que foi inicialmente fabricado ou para fins diversos;
- Recauchutagem – reconstrução do pneu para que este consiga novamente contribuir ativamente para o fim que foi projetado;
- Reciclagem – Caso os materiais descritos anteriormente, inaptidão do pneu para o seu uso inicial é processado para servir de matéria-prima para outros produtos;
- Valorização Energética – combustão dos pneus usados para recuperação energética.



7. CASOS EM ESTUDO

No presente documento procedeu-se à caracterização e análise de um conjunto de situações recentemente implementadas ou projetadas, concretamente:

- Viaduto de Queluz Belas;
- Viaduto da Caparica;
- Estação de Benfica;
- Linha de Sintra: entre o Pk's 13+750 e 18+250;
- Metropolitano de Lisboa: Prolongamento da linha vermelha, troço Alameda – Campolide.

Em seguida, para cada um dos casos identificados procede-se à sua descrição, tendo por base o enquadramento, a situação inicial, as medidas de correção implementadas e o resultado final.

7.1 Viaduto de Queluz Belas

O viaduto de Queluz-Belas²⁰, também apelidado por Viaduto do Jamor, refere-se a uma Obra de Arte localizada na linha de Sintra, junto à estação de Queluz-Belas e que tem as seguintes características:

- 4 Vias-férreas;
- 196 m de extensão;
- Cota absoluta de 118 m;
- Tabuleiros de betão;
- Via balastrada;
- Travessas monobloco de betão;
- Zona com grande densidade populacional.

²⁰ Fontes: [5] [8]



Na Figura 7.1 pode-se observar a localização desta Obra de Arte, enquanto que na Figura 7.2 se apresenta a correspondente Secção Transversal Tipo.



Figura 7.1 – Localização do Viaduto do Jamor [19]

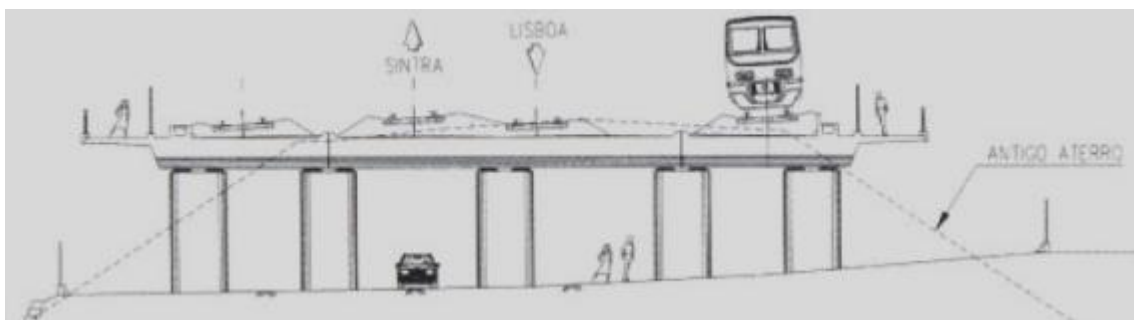


Figura 7.2 – Viaduto Queluz-Belas - Secção Transversal Tipo [26]

O viaduto do Jamor foi objeto de estudo por forma a avaliar a gama de valores associadas ao ruído em diversas cotas. No relatório é referido que a previsão das condições acústicas foi realizada segundo um modelo informático tridimensional específico, tendo em consideração toda a morfologia da envolvente do viaduto.

Na Figura 7.3 e na Figura 7.4, podem observar-se as gamas de valores associadas às cotas 118 m e 4 m, em resultado de simulações suportadas em vias não tratadas.

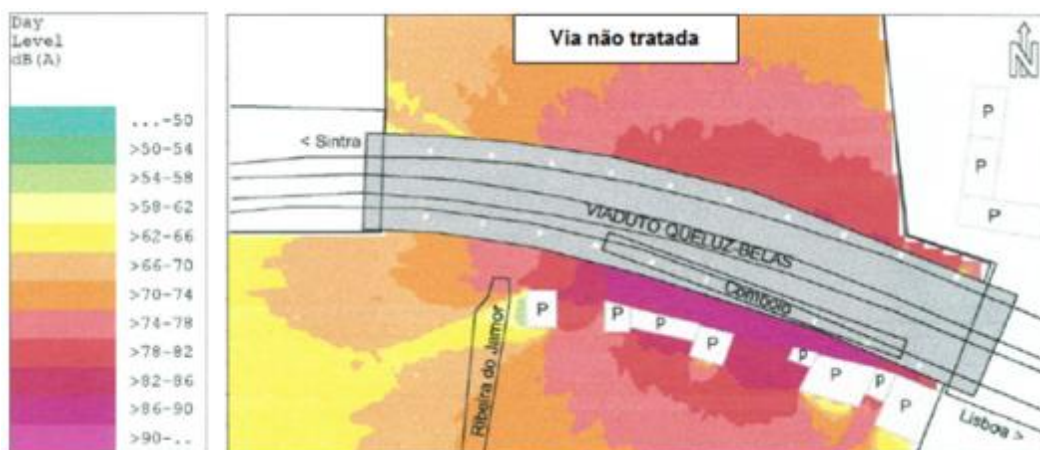


Figura 7.3 – Simulação da radiação sonora da estrutura do viaduto, à cota absoluta de 118 m (Via não Tratada) [8]



Figura 7.4 - Simulação da radiação sonora da estrutura do viaduto, à cota relativa de 4 m do solo (Via não Tratada) [8]

Da análise das figuras anteriores é possível constatar que a gama de valores é excessiva face as disposições normativas, $Leq_{diurno} \leq 60$ dB (A) para zonas residenciais. Consta igualmente no referido relatório que o valor representativo (Leq) de toda a gama de valores obtida, designadamente nas fachadas dos edifícios mais próximos e durante a passagem das composições (cerca de 10 segundos) é de 85 dB (A).

O ruído aéreo provocado pela circulação de composições nas vias mais recuadas não produz grande impacto, sendo que esta situação resulta da proteção conferida pela própria plataforma e pela instalação de barreiras acústicas correntes. Em todo o caso, o ruído radiado pela estrutura da plataforma requer cuidados acrescidos.

A solução implementada passou pela colocação de uma lâmina contínua de material resiliente, de baixa rigidez dinâmica (mantas de balastro). A aplicação desta medida demonstrou ganhos de atenuação na ordem dos 12 a 15 dB (A), sendo estes ganhos perfeitamente perceptíveis na Figura 7.5 e na Figura 7.6.

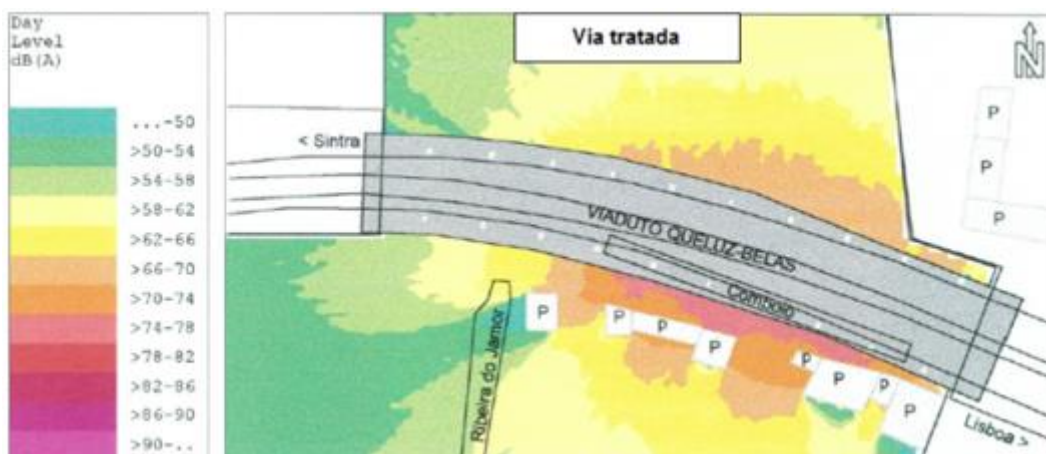


Figura 7.5 - Simulação da radiação sonora da estrutura do viaduto, à cota absoluta de 118 m (Via Tratada) [8]

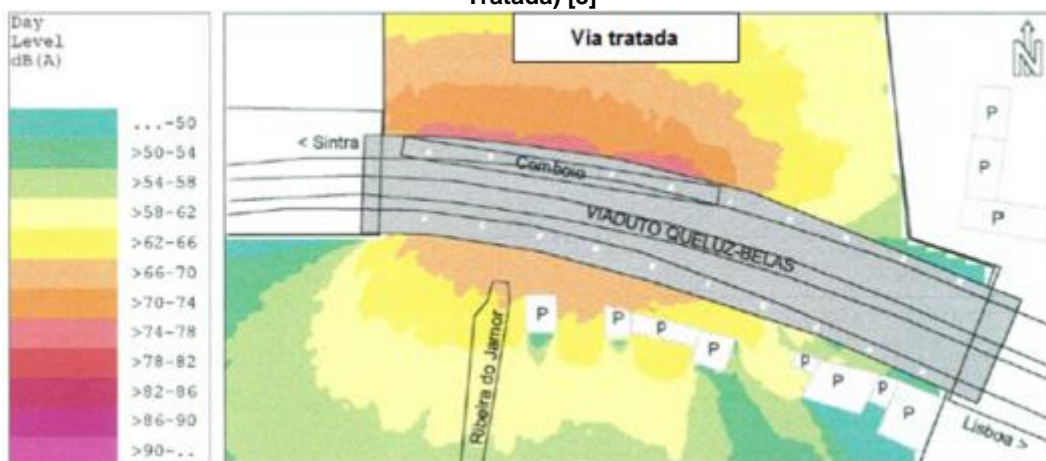


Figura 7.6 - Simulação da radiação sonora da estrutura do viaduto, à cota relativa de 4 m do solo (Via Tratada) [8]

O $Leq_{passagem}$ sofreu uma atenuação de 85 dB (A) para 75 dB (A), ou seja uma redução de 10 dB (A). O valor final não é o ideal, contudo aproxima-se muito mais das disposições normativas.

7.2 Viaduto da Caparica

O viaduto da Caparica²¹ localiza-se no Concelho de Almada, entre Vale das Moças e a Quinta Velha, e constitui um atravessamento desnivelado sobre a via rápida para a Costa da Caparica. Apresenta as seguintes características [4]:

- 2 Vias-férreas;
- 525 m de extensão;

²¹ Fonte: [9]



- Largura de 13,50 m;
- Tabuleiros de betão;
- Via balastrada;
- Travessas monobloco de betão;
- Zona com uma densidade populacional considerável.

O viaduto da Caparica, cuja localização pode ser observada na figura seguinte, serviu como um modelo experimental de grande escala, onde se procedeu à implantação de troços com e sem isolamento anti-vibrático, criando assim condições que permitem a análise do comportamento dos materiais aplicados para efeitos da atenuação do ruído.



Figura 7.7 - Localização do Viaduto da Caparica [19]

Para os troços com isolamento anti-vibrático, procedeu-se à colocação de uma manta resiliente de baixa rigidez (manta de balastro).

As medições do $Leq_{passagem}$ atingiram valores de cerca de 90 dB (A) nos troços sem qualquer tratamento, enquanto que nos troços com tratamento, considerando os mesmos parâmetros, os valores do $Leq_{passagem}$ não excederam os 77 dB (A).

Os valores de atenuação finais traduziram-se entre os 12 e os 15 dB (A) sob a plataforma e entre os 10 dB (A) e os 12 dB (A) nas fachadas das edificações mais próximas.

Durante a fase de elaboração do presente documento, em visita ao local, e em resultado da interação entre o material circulante e a via, possível identificar a existência de zonas com tratamento e sem tratamento.

7.3 Estação de Benfica

A estação de Benfica²² fica situada ao km 6+275 da linha de Sintra [29], numa zona com elevada densidade populacional (Figura 7.8). Apresenta as seguintes características [28]:

- 4 Vias-férreas;
- Extensão útil das vias varia entre os 215 e 236 m;
- Plataformas com 220 m de comprimento;
- Altura das plataformas 90 m;
- Tabuleiros de betão;
- Via balastrada;
- Travessas monobloco;



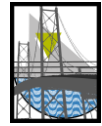
Figura 7.8 – Localização da Estação de Benfica [19]

Da análise do relatório da estação de Benfica, mais concretamente das metodologias empregues para a mitigação do ruído e vibração na zona da passagem interior, constata-se que este caso é pioneiro na aplicação, em Portugal, de mantas resilientes de balastro.

O referido relatório versa no essencial a explicação das medidas aplicadas em 1994 e ensaios realizados em 1995. Complementarmente no mesmo é incluída informação relativa aos materiais utilizados, reportando o estado de degradação dos mesmos com o uso passados 6 anos após a sua aplicação (2001).

Os índices elevados de ruído apenas foram detetados em 1994, sendo que nesta data a estação já se encontrava em funcionamento. Em resultado das medições realizadas junto

²² Fonte: [7] [28]



à área comercial e bilheteira (Figura 7.9), constatou-se que os valores do ruído eram excessivos, na ordem dos 80 a 86 dB (A), provocando grande incómodo para os utentes.



Figura 7.9 – Interior da Estação de Benfica [28]

Com o intuito de reduzir a intensidade de campos sonoros, foram preconizadas as seguintes medidas:

- Instalação de um teto falso sonoro sob a cobertura da passagem inferior;
- Substituição da palmilha existente por uma de menor rigidez;
- Instalação de uma manta resiliente de balastro.

Pretendia-se com a aplicação destas medidas uma redução na ordem dos 15 dB (A).

Após aplicação das medidas corretivas, obtiveram-se os resultados apresentados na Figura 7.10.

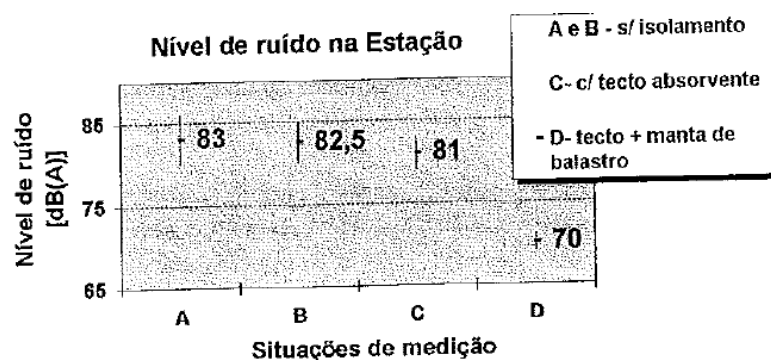


Figura 7.10 – Nível de ruído na estação de Benfica [7]



Da análise dos mesmos é possível constatar que após a instalação do conjunto de medidas, se obteve, em termos médios, uma redução de 13 dB (A).

Tendo em conta as potencialidades das medidas utilizadas, foi entendido como necessária a observação do comportamento dos materiais ao longo do tempo.

Nesse sentido, em 2001 foram realizados ensaios e testes, envolvendo:

- Recolha de amostras das palmilhas (3 locais diferentes);
- Recolha de amostras da manta resiliente de balastro (3 locais diferentes);
- Realização de medições acústicas.

Os testes realizados incidiram sobre a análise visual e dimensional dos elementos e análise das propriedades físicas. No caso da manta de balastro foi ainda realizada uma análise às características mecânicas.

No caso da manta de balastro, esta não apresentava sinais de degradação mantendo regra geral a sua espessura inicial (40 mm e 20 mm).

Em relação às propriedades físicas da manta, praticamente todos os valores se encontravam em conformidade com as especificações. A exceção foi na densidade, dureza e compressibilidade, tendo tido como consequência o assentamento da manta numa superfície irregular o que levou ao seu desgaste e ligeira redução de espessura (mais notório nas mantas com espessura mais reduzida).

Por último, a análise das propriedades mecânicas, realizadas no laboratório interno e no LNEC, reportam que o comportamento mecânico das mantas antigas e novas são bastante semelhantes ao nível da rigidez dinâmica e estática. De salientar igualmente que foi constatado um ligeiro incremento da rigidez da manta.

A análise das palmilhas apontou para resultados similares aos obtidos para a manta de balastro, mantendo a sua dimensão original, 150 mm x 180 mm, tendo-se constatado uma ligeira redução na sua espessura (10 mm). Esta redução de espessura teve origem na deformação plástica.

Tendo presente a existência de algumas alterações das características dos materiais, o teste final incidiu sobre a avaliação das características acústicas e vibráteis, tendo-se em



consequência dos resultados obtidos, concluído que as alterações identificadas não despoletaram qualquer agravamento, nas condições acústicas e vibráteis da estação observadas após a implementação das medidas mitigadoras.

7.4 Linha de Sintra, entre o Pk's 13+750 e 18+250

A intervenção na linha de Sintra entre os Pk's 13+750 e 18+250²³, contempla, alguns pontos notáveis de que se destacam:

- Estação de Barcarena;
- Escola prática da GNR;
- Passagem inferior dos Missionários;
- Quadruplicação da via entre os km 16+200 e 18+250, incluindo a estação do Cacém (Figura 7.11).



Figura 7.11 - Localização da Estação de Agualva-Cacém [19]

Apresenta as seguintes características:

- 4 Vias-férreas;
- Tabuleiros de betão;
- Via balastrada;
- Travessas monobloco de betão;
- Zona com grande densidade populacional.

²³ Fonte predominante neste capítulo [1]



O relatório referente à intervenção nestas zonas aborda essencialmente a instalação de barreiras acústicas (Figura 7.12). Este tema não foi abordado no presente documento, na medida em que se trata de uma solução mais periférica e comum, tendo já sido objeto de vários estudos.

No entanto, as barreiras acústicas, função dos materiais constituintes, têm como objetivos bloquear e absorver grande parte do ruído. Conforme referido em 4.1.2, o fenómeno da difração não deve ser esquecido.



Figura 7.12 – Barreiras acústicas [22]

Nos locais mencionados anteriormente, os índices de ruído apresentavam valores superiores aos admissíveis, sendo desta forma necessário considerar medidas que atenuassem estes valores.

Em todas as zonas estudadas, a colocação de barreiras acústicas foi a solução privilegiada, tendo desta forma sido possível a harmonizar²⁴ a existência da linha férrea com as habitações na envolvente.

A Passagem Inferior dos Missionários (Figura 7.13), foi objeto de medidas específicas traduzidas na colocação adicional de manta de balastro e palmilhas aplicadas em travessas monobloco de betão. Esta solução foi igualmente implementada na estação de Barcarena (em curva), nas duas linhas localizadas no lado poente, dada a proximidade destas a edifícios de habitação ali existentes.

²⁴ A colocação de barreiras acústicas nem sempre se traduz na obtenção de soluções do agrado dos moradores, nomeadamente por questões estéticas e pelo fato de a mesma constituir uma barreira, nomeadamente em termos visuais.

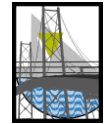


Figura 7.13 - “Passagem inferior dos Missionários” [19]

No relatório não foram identificados valores relativos às reduções decorrentes das soluções implementadas.

7.5 Metropolitano de Lisboa - Prolongamento da linha vermelha, troço Alameda – Campolide

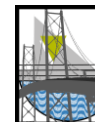
As obras de prolongamento da linha vermelha²⁵ contemplam uma parte central da cidade de Lisboa. Esta zona tem uma elevada ocupação residencial, além de possuir uma série de edifícios considerados sensíveis, nomeadamente escolas e hospitais (Figura 7.14).



Figura 7.14 - Localização do troço Alameda-São Sebastião [19]

Na presente data, o troço São Sebastião – Campolide ainda não se encontra concluído, sendo as estações terminais a estação de São Sebastião e a estação do Aeroporto de Lisboa.

²⁵ Fonte: [16]



Apresenta as seguintes características:

- 2 Vias-férreas;
- Tabuleiros de betão em laje flutuante;
- Travessas Bi-bloco de betão;
- Zona com grande densidade populacional, onde se incluem equipamentos coletivos sensíveis.

Da análise do relatório verifica-se que se trata de uma análise diferenciada do troço, tendo em atenção as necessidades vigentes à superfície, nomeadamente verificando se as vibrações associadas à fase de exploração da linha:

- Provocam danos das edificações;
- Se são detetadas pelo ser humano;
- Sendo detetadas, se irradiam como ruído.

Neste sentido, o troço foi segmentado e analisado, tendo em atenção:

- O valor da vibração residual;
- A velocidade de vibração máxima e atenuação mínima requerida (dB).

O valor limite para a velocidade de vibração foi de $0,03 \text{ mm.s}^{-1}$ o que corresponde a níveis sonoros na ordem dos 40 dB (A).

Um dos laboratórios do IST - Instituto Superior Técnico, onde estão instalados lasers de alta precisão, carece de índices de vibração diminutos, sendo que neste caso o valor limite foi estabelecido pelo fabricante dos equipamentos sensíveis.

A primeira análise baseou-se na medição das vibrações residuais em vários pontos. Os valores observados eram bastante reduzidos. Posteriormente foi realizada uma simulação / projeção dos valores da velocidade de vibração em função da distância à via, utilizando o modelo FTA (E.U.A).



Os valores perspectivados para a velocidade de vibração eram superiores ao limite admissível. Para cada segmento foi estipulado um valor de atenuação mínima requerida, tendo sido equacionadas 5 soluções.

- As duas primeiras soluções passaram pela aplicação de material resiliente com espessuras e valores de rigidez dinâmica diferentes.

Para atenuações de 20 dB (solução 1) utilizou-se uma espessura de 20 mm com rigidez dinâmica inferior a 50 MN.m^{-3} .

Para atenuações na ordem dos 25 dB utilizou-se uma espessura de 30 mm com rigidez dinâmica inferior a 26 MN.m^{-3} .

A aplicação do material resiliente nas soluções 1 e 2 foi feita entre a soleira do túnel e a laje de suporte à via, (Figura 77)

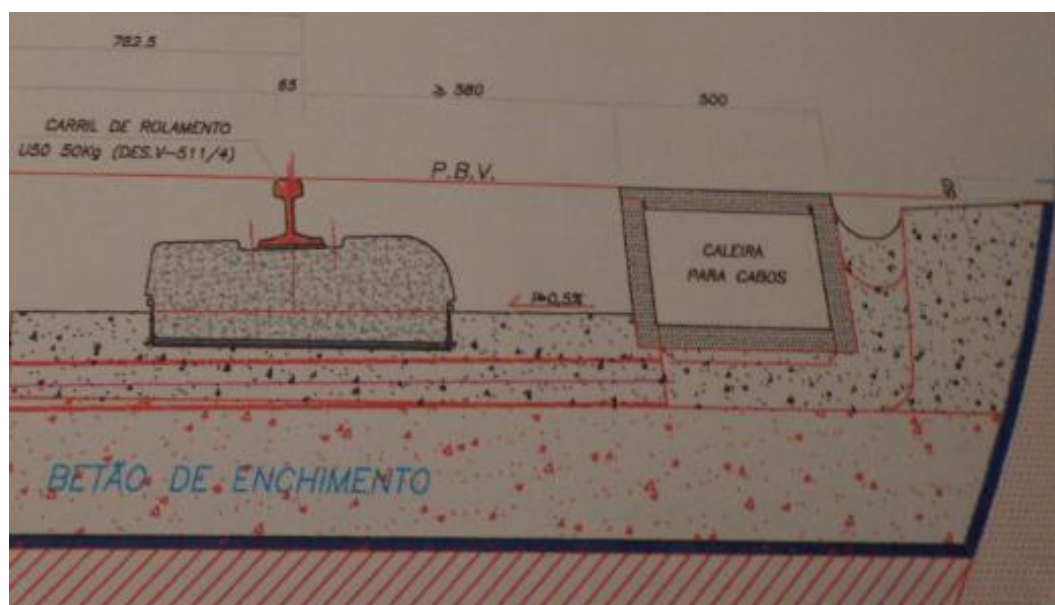


Figura 7.15 - Esquema de aplicação das soluções 1 e 2 [16]

- A terceira solução, para reduções de 30 dB (A), consistiu na aplicação de uma manta contínua com apoios resilientes discretos, revestida por painel de cofragem (Figura 7.16 e Figura 7.17).

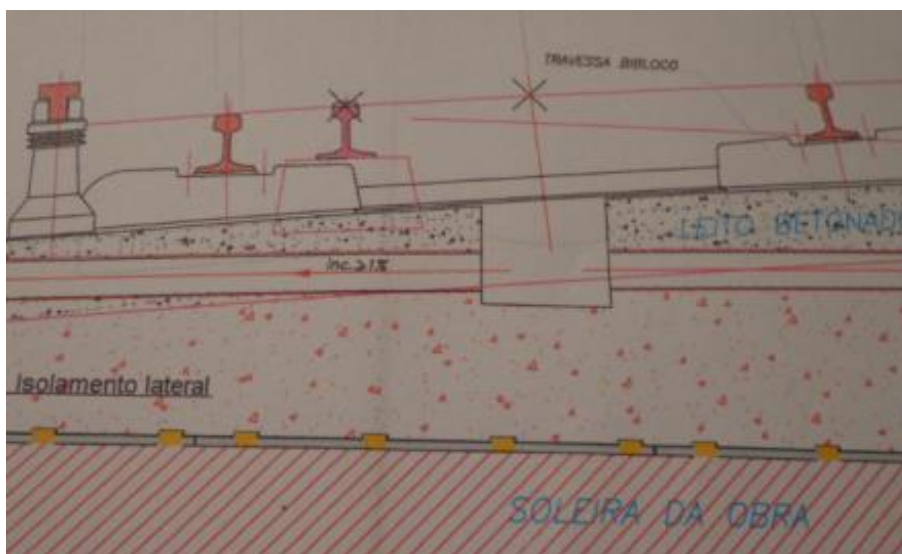


Figura 7.16 – Esquema de aplicação da 3ª solução [16]

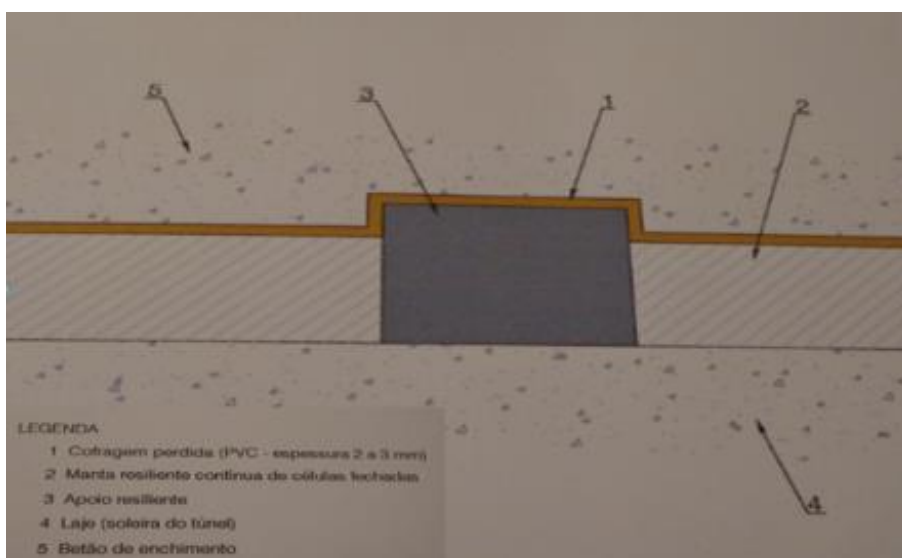


Figura 7.17 – Pormenor do esquema de aplicação da 3ª solução [16]

- A quarta e a quinta solução, para atenuações na ordem dos 30 a 35 dB (A), consistiram na aplicação de uma “pantufa de borracha” com palmilhas de material resiliente, estas últimas com espessuras na ordem dos 50 mm. Este tipo de tiras apresenta um formato em “L” com uma largura mínima de 340 mm, por forma a garantir o seu correto posicionamento e para permitirem a contenção dos esforços laterais (Figura 80).

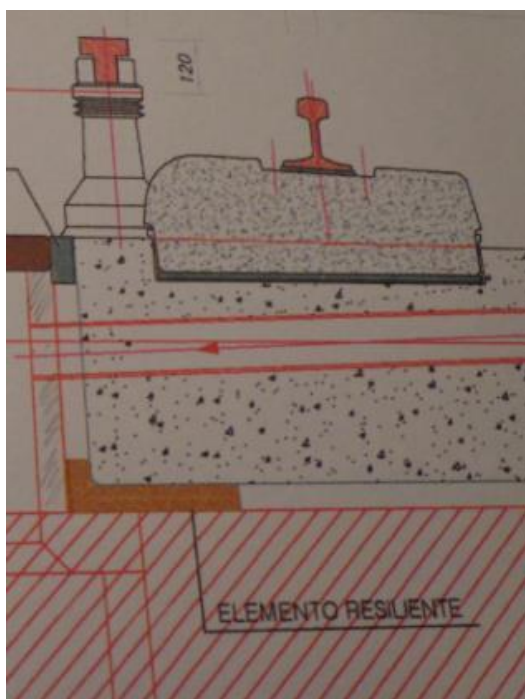


Figura 7.18 - Pormenor de aplicação da 4ª e 5ª solução [16]

As tiras não são colocadas continuamente, permitindo uma adequação da rigidez do sistema e ainda uma fácil monitorização bem como a possibilidade de acesso para intervenção/ajustamento, caso os resultados fiquem aquém do exigido.

Todas as soluções encontram-se em favor da segurança, conferindo atenuações com valores superiores em 4 e 5 dB (A) relativamente ao necessário.

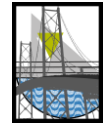
Na zona associada às Instalações do IST, foi instalada a solução 4 e a solução 5.

7.6 Reflexões sobre os casos de estudo

Embora numa fase inicial fosse intenção proceder a uma análise comparativa dos casos em estudo, no decorrer do desenvolvimento do presente documento considerou-se que este objetivo não era viável face à singularidade dos mesmos. No entanto considera-se que sobre os mesmos devem ser emitidas algumas reflexões:

- No caso dos viadutos, a aplicação de mantas resilientes e palmilhas conduz a reduções significativas dos índices de ruído e vibrações

Durante a fase de elaboração do presente documento, em visita ao Viaduto da Caparica, (realizado na cabine de condução de uma unidade tripla elétrica) foi possível identificar a existência de zonas com tratamento e sem tratamento.



- Em troços de via corrente o método persistente traduz-se na aplicação de barreiras acústicas.

Trata-se de uma solução que tem por base uma maior atenção relativamente ao ruído de rolamento, em detrimento do ruído aerodinâmico que só assume valores consideráveis a velocidades de 300 km/h.

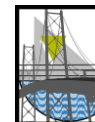
- A aplicação destes materiais ou outros que se venham a desenvolver, contribuem de forma ativa para uma melhor convivência da via férrea com a comunidade.

Deve ser feita no entanto uma ressalva, em particular em relação aos métodos construtivos e materiais a utilizar, por forma a que os mesmos não sejam tão apelativos a atos de vandalismo, em particular o roubo, situação que relativamente às barreiras acústicas assume uma enorme importância e que foi constatada no local, nomeadamente na ligação Pragal-Setúbal.

A durabilidade dos materiais, apesar da constatação de algumas alterações ao nível das suas dimensões (espessura), começa a ser interessante, pois as suas características funcionais apresentam poucas alterações.

- Relativamente a soluções para vias tipo metro (regra geral em zonas de acesso interdito ao cidadão comum), verifica-se que o leque de soluções é vasto e pode ser ajustada praticamente a cada nível de exigência.

Constata-se alguma dificuldade na compatibilização entre a necessidade de redução do ruído e vibração com a quantidade de material a aplicar (questão económica) e a garantia da rigidez e suporte de todo o sistema de sustentação da via.



8. CONCLUSÕES

Em resultado da pesquisa de suporte, designadamente a bibliográfica e os relatórios técnicos refletidos no capítulo 7 é possível retirar as seguintes conclusões:

- As exigências funcionais associadas às vias férreas, sejam elas do tipo pesado (metropolitano, convencional e alta velocidade) ou ligeiras (metro ligeiro), são cada vez maiores, sendo igualmente maiores as necessidades de estabelecer equilíbrios entre estas e a sua envolvente, em particular a que se relaciona com a atividade humana;
- Para velocidades superiores a 300 km/h, a passagem do comboio provoca um grande deslocamento de massa de ar, fazendo com que o ruído aerodinâmico assuma um papel dominante, sendo que para valores inferiores, regra geral a partir dos 150/200 km/h, já assume alguma importância;
- Fruto de pesquisas e testes realizados, em particular pela indústria, começam a ser disponibilizadas soluções que permitem a atenuação (a anulação ainda é um objetivo distante e provavelmente inalcançável) dos efeitos indesejados relacionados com o ruído e as vibrações produzidas pelo modo ferroviário;
- A forma mais eficaz e também a mais económica é sem dúvida aquela que procura atenuar os efeitos na fonte uma vez que, entre outros aspetos, o número de zonas e dimensão a tratar é menor.
- A não intervenção, numa fase inicial, (designadamente em projeto), para atenuar os efeitos do ruído conduzirá inevitavelmente a situações de incómodo, os quais podem conduzir, por pressão dos atingidos, a manifestações de desagrado e em último caso à imposição (eventualmente por ordem judicial) de medidas para atenuação dos efeitos, medidas essas que se podem traduzir em elevados custos, função, nomeadamente de dificuldades acrescidas em resultado da linha já se encontrar em exploração.
- Relativamente ao designado ruído estrutural (associado a viadutos), o mesmo deve ser merecedor de uma atenção mais cuidada, não só pelo impacto que o mesmo pode ter nas edificações vizinhas, mas também ao nível da própria estrutura.



- Dada a quantidade de variáveis envolvidas, as soluções a aplicar não são únicas e generalizadas, pelo que, em fase de projeto se deve proceder a um estudo aprofundado, tendo como objetivo uma caracterização correta do problema e a definição de soluções ajustadas.
- No caso de vias expostas, as soluções podem considerar 3 níveis de intervenção, concretamente:
 - Nível de intervenção 1 – Entre o carril e as travessas, mediante a aplicação palmilhas que serão contínuas no caso de vias em betão. Esta solução permite reduções da ordem dos 3 dB aos 10 dB, estando esta dependente da rigidez das palmilhas colocadas;
 - Nível de intervenção 2 – Entre as travessas e a superfície de contacto, traduzida na aplicação de palmilhas de travessa em vias balastradas, permitindo reduções da ordem dos 10-15 dB, ou na colocação de palmilhas na base das fixações, bem como na alteração das travessas (nas situações em que estas existam), o que permite reduções na ordem dos 10 dB e 12 dB. Poderá ainda recorrer-se a travessas elastómeras;
 - Nível de intervenção 3 – a realizar entre a camada inferior da infraestrutura, balastro ou laje, e o terreno natural. Esta solução pode ser materializada através da colocação de mantas de balastro, no caso das vias balastradas ou em vias assentas em lajes de betão, na colocação descontinuada do material de isolamento ou ainda numa conjugação destas duas últimas soluções. Com este tipo de soluções é possível uma redução do valor das frequências de ruído e grande capacidade de isolamento da vibração, 15-25 dB;
- No caso das vias embebidas, as medidas implementadas para reduzir o ruído e a vibração passam por 3 metodologias construtivas distintas:
 - Para vias sem travessas, envolvimento do carril com um elastómetro pré-fabricado, permitindo um assentamento de forma continuada;
 - Para vias com travessas, envolvimento do carril com um elastómetro pré-fabricado, mas onde o mesmo poderá ter um assentamento descontínuo;

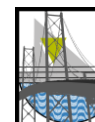


- Para vias sem travessas, envolvimento do carril com um elastómetro líquido, sendo o mesmo “derramado” para a zona entre o carril e a estrutura de suporte (geralmente betão);
- A aplicação dos materiais resilientes, para além de atenuar os efeitos nefastos do ruído e vibrações, permite igualmente melhorar a vida útil dos componentes da via, uma vez que permite uma melhor distribuição das tensões geradas, em particular as que têm origem no material circulante;
- Para além de permitirem a atenuação do ruído e vibrações, os materiais anti-vibráteis são igualmente uma mais-valia em termos ambientais, uma vez que na sua constituição também podem ser integradas matérias recicláveis, como por exemplo a borracha dos pneus (reutilização / reciclagem);
- Pese o facto da existência de legislação, em especial no campo do ruído²⁶, considera-se que a mesma deve ser objeto de revisão/desenvolvimento, por forma que esta seja mais aderente às necessidades ambientais, às exigências funcionais dos equipamentos ferroviários, bem como às soluções que já estão testadas ou em desenvolvimento permitindo assim estabelecer coerência e uma situação sustentada.

Em termos de desenvolvimento de trabalhos futuros, para além dos aspetos inerentes à legislação sobre vibrações, considera-se desejável a realização de um troço experimental, com a aplicação, eventualmente por secções de diferentes soluções/materiais e posteriormente uma análise comparativa com a situação inicial recorrendo a testes, medições e mapas de ruído.

Seria igualmente interessante a realização de análises de natureza económica deste tipo de investimentos, cruzada com as vantagens daí decorrentes, nomeadamente em termos da durabilidade da via bem como da sua manutenção durante a sua vida útil.

²⁶ Relativamente a vibrações induzidas pelas Redes de Transporte, a legislação nacional é inexistente, sendo utilizadas recomendações do LNEC



9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Acusti Control - Quadruplicação da via entre os Pk's 13+750 e 18+250 da Linha de Sintra, incluindo a remodelação das estações de Barcarena e do Cacém: Revisão do projeto das medidas de minimização do ruído Volume I (Outubro 2009).
- [2] AC Engenharia Consultoria e Comércio Ltda.
- <http://www.acengenharia.com.br/servicos-metros.html> (consultado a 10 de Dezembro de 2012)
- [3] Agência Portuguesa do Ambiente (APA)
- <http://www.apambiente.pt/index.php?ref=16&subref=86&sub2ref=529> (Outubro 2009).
- [4] Ambiente, Instituto (2004). Ruído e a Cidade - tradução do documento original do ministre de *l'Equipement et de l'Aménagement du territoire- Le bruit et la ville*.
- [5] Anteprojetos - <http://www.anteprojetos.com.pt/>
- [6] CDM - <http://www.cdmportugal.pt/>
- [7] CDM, Estação de Benfica – Condicionamento vibrático e acústico da passagem inferior: Estudo do comportamento das mantas de balastro CDM (Julho 2002).
- [8] Certiprojeto – Ruído estrutural em viadutos ferroviários: Relatório Viaduto Queluz-Belas (Julho 2000).
- [9] Certiprojeto – Ruído estrutural em viadutos ferroviários: Relatório Viaduto da Caparica (Setembro 2000).
- [10] CP – Comboios de Portugal
- <http://www.cp.pt/cp/displayPage.do?vgnextoid=6ef3079ffa057010VgnVCM1000007b01a8c0RCRD> (Consultado a 7 de Junho de 2012)



- <http://www.cp.pt/cp/displayPage.do?vnextoid=5c54079ffa057010VgnVCM1000007b01a8c0RCRD> (Consultado a 7 de Junho de 2012)
 - <http://www.cp.pt/cp/displayPage.do?vnextoid=1d94079ffa057010VgnVCM1000007b01a8c0RCRD> (Consultado a 7 de Junho de 2012)
 - <http://www.cp.pt/cp/displayPage.do?vnextoid=d5433cddefcb7010VgnVCM1000007b01a8c0RCRD> (Consultado a 7 de Junho de 2012)
- [11] Cruz, Eng.º António Sequeira da (2011). Apontamentos da disciplina de Caminhos-de-ferro do Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.
- [12] Directorate General for Internal Policies. Policy Departement B: Structural and Cohesion Policies – Transport and Tourism. Reducing Railway Noise Pollution (Study 2012)
- [13] Decreto-Lei nº146/2006, 31 de Julho.
- [14] Decreto-Lei nº9/2007, 17 de Agosto.
- [15] Edilon-Sedra - <http://www.edilonsedra.com/>
- [16] Engenharia de Acústica e Ambiente, Lda. – Relatório Final do Prolongamento da Linha Vermelha Alameda-Campolide (Novembro 2007).
- [17] Esveld, Coenraad (2001). Modern Railway Track – Delft University of technology.
- [18] Gonçalves, Henrique Manuel Ferreira da Silva (2008). Ruído de comboios de alta velocidade: Emissão e medidas mitigadoras – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- [19] Google Maps - <http://maps.google.pt/>
- [20] ISO, International Standard 14837-1: Mechanical vibration. Ground-borne noise and vibration arising from rail systems. Part 1. General guidance. 2005.
- [21] ISO, International Standard 2631-1: Mechanical vibration and shock. Evaluation of human exposure to whole-body vibration. Part 1: General requirements. 1997.



- [22] Martins, Eng.º Armando Martins (2012)
- [23] MegaMark
- <http://www.megamark.fr/optimiser-votre-communication/vehicules/monumental/Total-covering-des-trains.html> (consultado a 12 de Dezembro de 2012)
- [24] Metro – Transportes de Lisboa <http://www.metrolisboa.pt/>
- <http://www.metrolisboa.pt/empresa/um-pouco-de-historia/> (consultado a 7 de Dezembro de 2012)
 - <http://www.metrolisboa.pt/empresa/um-pouco-de-historia/evolucao-da-rede/> (consultado a 7 de Dezembro de 2012)
- [25] Penny, C. (2003) In search of the ideal trackform, Rail-Tech Europe, 01 a 03 de Abril de 2003, Utrecht.
- [26] Profico – <http://www.profico.pt/>
- <http://www.profico.pt/imagens/editor/Viaduto%20Jamor.pdf> (consultado a 4 de Dezembro de 2012)
- [27] Quesado, Alexandra Maria da Silva (2010). Análise e mitigação de vibrações induzidas por tráfego ferroviário na vizinhança de vias de alta velocidade - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- [28] REFER - Diretório de rede 2014
- [29] REFER - <http://www.refer.pt>
- <http://www.refer.pt/MenuPrincipal/REFER.aspx> (Consultado a 6 de Setembro de 2012)
 - <http://www.refer.pt/MenuPrincipal/TransporteFerroviario/Lexico.aspx?Letter=P> (Consultado a 6 de Setembro de 2012)
- [30] REFER – Manual de via da REFER



- [31] REFER (2008) – Mapa estratégico de ruído das grandes Infra-estruturas de transporte ferroviário: Linha de Cascais (Revisão 1).
- [32] Sampaio, Chedas (2012). Conceitos Fundamentais de Acústica
- [33] Schiappa de Azevedo, Fernando; Patrício, Jorge LNEC (2001). Vibrações ambientes. Critérios de danos e de incomodidade atualidade e perspectivas futuras.
- [34] Strail - <http://www.strail.de/index.php?id=160&L=1> (consultado a 10 de Dezembro de 2012)
- [35] Thompson, David (2009). Railway Noise and Vibration – Mechanisms, modeling and means of control.
- [36] Trabalho, Agência Europeia para a Segurança e Saúde no Trabalho
- http://www.osha.europa.eu/pt/topics/noise/what_is_noise_html (Consultado a 20 de Outubro de 2012)
- [37] Transport of London - <http://www.tfl.gov.uk/gettingaround/14091.aspx>
- [38] trXXI - http://www.transportes-xxi.net/files/pdf/cf_museustr.pdf (consultado a 12 de Dezembro de 2012)
- [39] Valorpneu - <http://www.valorpneu.pt/>
- http://www.valorpneu.pt/artigo.aspx?lang=pt&id_objet=69&name=O-Que-Fazemos (consultado a 12 de Dezembro de 2012)
- [40] Vossloh - <http://www.vossloh.com> (consultado a 15 de Dezembro de 2012)