



UNIVERSIDADE D
COIMBRA



Ana Francisca de Freitas Grácio

O AMBIENTE SONORO NAS ESTAÇÕES DE
CAMINHO DE FERRO - AVALIAÇÃO E MEDIDAS DE
MELHORIA EM DUAS ESTAÇÕES FERROVIÁRIAS PORTUGUESAS

THE SOUND ENVIRONMENT ON THE RAILWAY STATIONS - EVALUATION AND
MEASURES OF IMPROVEMENT IN TWO PORTUGUESE RAILWAY STATIONS

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, na área de Especialização
em Construções, orientada pelo Professor Doutor Diogo Rosa Mateus e pelo
Professor Doutor Paulo Amado Mendes

Coimbra, 15 de fevereiro de 2019



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

Ana Francisca de Freitas Grácio

O AMBIENTE SONORO NAS ESTAÇÕES DE CAMINHO DE FERRO - AVALIAÇÃO E MEDIDAS DE MELHORIA EM DUAS ESTAÇÕES FERROVIÁRIAS PORTUGUESAS

THE SOUND ENVIRONMENT ON THE RAILWAY STATIONS - EVALUATION AND MEASURES OF IMPROVEMENT IN TWO PORTUGUESE RAILWAY STATIONS

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, na área de Especialização em Construções,
orientada pelo Professor Doutor Diogo Rosa Mateus e pelo Professor Doutor Paulo Amado Mendes

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

Coimbra, 15 de fevereiro de 2019

AGRADECIMENTOS

Concluída a dissertação, não posso deixar de agradecer a todos os que, de alguma maneira, contribuíram para esta concretização:

Ao professor Doutor Diogo Rosa Mateus e ao professor Doutor Paulo Amado Mendes pela orientação, pelos ensinamentos e pela simpatia, ao longo destes meses.

Ao Engenheiro Diogo Vasconcelos e ao Engenheiro Carrasquinho de Freitas, da empresa Infraestruturas de Portugal, SA, por toda a ajuda disponibilizada ao longo das medições, efetuadas na Estação Ferroviária de Coimbra-B e na Estação Ferroviária de Aveiro.

À Dr.^a Ana Paula Sousa, da empresa Comboios de Portugal, E.P.E., pela informação fornecida relativa às várias estações.

Aos meus pais, à minha irmã e ao Gonçalo por me apoiarem todos os dias e por nunca deixarem uma palavra de conforto por dizer.

Ao meu namorado por toda a paciência e por ter tido a capacidade de acreditar no meu trabalho, nos dias em que, eu própria, não acreditava.

À minha família por todo o carinho e por toda a esperança que depositaram em mim.

Aos meus amigos por todo o companheirismo, pelos momentos felizes que me proporcionaram e por nunca me deixarem sozinha.

Ao meu tio e à minha prima por me terem mostrado que a vida é curta e imprevisível de mais para perder tempo.

RESUMO

As crescentes exigências da população, relativamente à sua qualidade de vida e ao conforto acústico dos espaços que frequentam, têm feito evoluir o interesse em lhes dar resposta. Uma boa capacidade acústica dos edifícios influencia o quotidiano de quem os habita, visita ou trabalha, nomeadamente, a sua saúde e a sua segurança.

Todavia, existem espaços mais vulneráveis do que outros, designadamente os que se consideram de circulação e de uso comunitário. É o caso das estações ferroviárias, onde se registam, frequentemente, níveis sonoros variáveis e potencialmente significativos. Ainda que sejam locais onde é necessária uma adequada acústica para a difusão de mensagens sonoras, através de sistemas eletroacústicos, são também espaços com elevada circulação de utilizadores e de veículos ferroviários.

Tendo consciência de que as estações são espaços inerentes ao quotidiano de muitas pessoas e que as suas condições acústicas são ainda um tema pouco explorado, pretendeu-se, com este trabalho, aliar uma revisão bibliográfica a uma caracterização do ambiente sonoro das zonas de espera e de circulação de duas estações ferroviárias portuguesas, com anos de construção distintos – Aveiro e Coimbra-B.

Desta forma, foi efetuada, numa primeira fase, uma pesquisa e respetiva compilação de definições e outros estudos de caso. Em segunda instância, efetuaram-se as medições nas duas estações selecionadas, tendo como base a Norma ISO 3382-1: obtiveram-se alguns parâmetros de qualidade sonora como o TR, o D₅₀, o RASTI e o STI. A subsequente análise e comparação dos seus valores permitiram a identificação de eventuais insuficiências acústicas e a definição genérica de algumas soluções que possam vir a melhorar a experiência dos utilizadores.

A presente dissertação de Mestrado foi elaborada no âmbito do protocolo celebrado entre a Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra e a empresa Infraestruturas de Portugal, SA e ainda no âmbito do Projeto POCI-01-0145-FEDER-029557 (NVTRail) – financiado por fundos FEDER através do COMPETE2020 – Programa Operacional Competitividade e Internacionalização (POCI) e por fundos nacionais (PIDDAC) através da FCT/MCTES.

Palavras-chave: estação ferroviária, condicionamento acústico, tempo de reverberação, parâmetros de qualidade sonora, reabilitação acústica

ABSTRACT

The increasing demands of the population on their quality of life and the acoustic comfort of the spaces that they use have also evolved the interest in responding to them. A good acoustic capacity of the buildings influences the daily life of those who inhabit them, visit or work, namely their health and safety.

However, there are spaces that are more vulnerable than others, such as those considered to be of circulation and community use. This is the case of railway stations, where variable and potentially significant noise levels are often recorded. Although they are places where an adequate acoustics is needed for the diffusion of sound messages through electroacoustic systems, they are also spaces with a high circulation of users and railway vehicles.

Bearing in mind that stations are spaces inherent to the daily life of many people and that their acoustic conditions are still an unexplored theme, it was intended, with this work, to combine a bibliographical review with a characterization of the sound environment of the waiting areas and circulation spaces of two portuguese stations, with different construction years - Aveiro and Coimbra-B.

Therefore, a research and compilation of definitions and other case studies was carried out in the first phase. In the second instance, the measurements were taken at the two stations, based on ISO 3382-1: some sound quality parameters such as TR, D₅₀, RASTI and STI were obtained. The subsequent analysis and comparison of their values allowed the identification of possible acoustic pathologies and the generic definition of some solutions that can improve the experience of the users.

The present dissertation was elaborated within the framework of the protocol celebrated between the Faculty of Science and Technology of the University of Coimbra and the company Infraestruturas de Portugal, SA and in the scope of Project POCI-01-0145-FEDER-029557 (NVTRail) – funded by FEDER funds through COMPETE2020 – Programa Operacional Competitividade e Internacionalização (POCI) and by national funds (PIDDAC) through FCT/MCTES.

Keywords: railway station, acoustic conditioning, reverberation time, sound quality parameters, acoustic rehabilitation

ÍNDICE

| | |
|---|----|
| 1 INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 1.1 Enquadramento Geral..... | 1 |
| 1.2 Objetivos da Dissertação..... | 2 |
| 1.3 Organização da Dissertação..... | 2 |
| 2 CONCEITOS TEÓRICOS..... | 4 |
| 2.1 O Som e o Ruído..... | 4 |
| 2.2 Acústica Exterior..... | 5 |
| 2.3 Acústica de Edifícios..... | 6 |
| 2.3.1 Modos de Propagação do Som em Espaços Fechados..... | 6 |
| 2.3.2 Campo Sonoro de um Espaço Fechado..... | 7 |
| 2.3.3 Coeficiente de Absorção..... | 8 |
| 2.3.4 Tempo de Reverberação..... | 8 |
| 2.3.5 Utilização da Fórmula de Sabine em Espaços com Elevada Absorção Sonora..... | 10 |
| 2.3.6 Ruído de Fundo..... | 12 |
| 2.3.7 Inteligibilidade e Privacidade da Palavra..... | 13 |
| 2.3.8 Relação Sinal/Ruído..... | 14 |
| 2.3.9 Condicionamento Acústico Interior..... | 14 |
| 2.3.10 Parâmetros de Qualidade Sonora..... | 15 |
| 3 A PROBLEMÁTICA DA ACÚSTICA NAS ESTAÇÕES FERROVIÁRIAS..... | 19 |
| 3.1 As Estações como Espaços de Uso Comunitário e de Circulação..... | 19 |
| 3.1.1 Características dos Espaços que Influenciam a sua Acústica..... | 20 |
| 3.1.2 Principais Fontes de Ruído Existentes..... | 21 |
| 3.1.3 Fenómenos Acústicos Percecionados..... | 24 |
| 3.2 Legislação Nacional em Vigor..... | 24 |
| 3.3 Estudos Acústicos Associados a Vários Espaços – Estado da Arte..... | 26 |
| 3.3.1 Zonas de Restauração..... | 26 |
| 3.3.2 Centros Comerciais..... | 28 |
| 3.3.3 Longos Corredores..... | 29 |
| 3.3.4 Estações Ferroviárias..... | 30 |
| 4 CARACTERIZAÇÃO ACÚSTICA DE DUAS ESTAÇÕES FERROVIÁRIAS – ESTUDOS DE CASO..... | 32 |
| 4.1 O Transporte Ferroviário em Portugal..... | 32 |
| 4.2 Caracterização da Rede Ferroviária Portuguesa - Linha do Norte..... | 32 |

| | |
|---|----|
| 4.3 Caracterização da Rede de Estações Ferroviárias Portuguesa..... | 33 |
| 4.4 Medições Acústicas Objetivas..... | 33 |
| 4.5 Equipamento Utilizado | 34 |
| 4.6 Estação Ferroviária de Coimbra-B – Estudo de Caso I..... | 34 |
| 4.6.1 Caracterização da Estação e da sua Zona Envolvente | 35 |
| 4.6.2 Pontos de Medição | 35 |
| 4.6.3 Resultados do Ruído Ambiente | 36 |
| 4.6.4 Resultados do Parâmetro Tempo de Reverberação (T20)..... | 39 |
| 4.6.5 Resultados do Parâmetro <i>Early Decay Time</i> (EDT)..... | 40 |
| 4.6.6 Resultados do Parâmetro Definição da Palavra (D ₅₀) | 41 |
| 4.6.7 Resultados dos Parâmetros <i>Rapid Speech Transmission Index</i> (RASTI) e <i>Speech Transmission Index</i> (STI) | 42 |
| 4.7 Estação Ferroviária de Aveiro - Estudo de Caso II..... | 43 |
| 4.7.1 Caracterização da Estação e da sua Zona Envolvente | 43 |
| 4.7.2 Pontos de Medição | 44 |
| 4.7.3 Resultados do Ruído Ambiente | 47 |
| 4.7.4 Resultados do Parâmetro Tempo de Reverberação (T20)..... | 48 |
| 4.7.5 Resultados do Parâmetro <i>Early Decay Time</i> (EDT)..... | 49 |
| 4.7.6 Resultados do Parâmetro Definição da Palavra (D ₅₀) | 50 |
| 4.7.7 Resultados dos Parâmetros <i>Rapid Speech Transmission Index</i> (RASTI) e <i>Speech Transmission Index</i> (STI)..... | 51 |
| 5 REABILITAÇÃO ACÚSTICA NOS ESTUDOS DE CASO – PROPOSTAS DE INTERVENÇÃO..... | 53 |
| 5.1 Análise Global de Resultados e Identificação de Insuficiências Acústicas..... | 53 |
| 5.1.1 Estação Ferroviária de Coimbra-B – Estudo de Caso I..... | 53 |
| 5.1.2 Estação Ferroviária de Aveiro - Estudo de Caso II | 53 |
| 5.2 Sugestões de Reabilitação Acústica | 54 |
| 5.2.1 Aplicações Correntes..... | 54 |
| 5.2.2 Estação Ferroviária de Coimbra-B – Estudo de Caso I..... | 58 |
| 5.2.3 Estação Ferroviária de Aveiro - Estudo de Caso II | 60 |
| 6 CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS | 65 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 67 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 2.1 - Gama audível do ouvido humano (Instituto do Ambiente (IA), 2004) | 5 |
| Figura 2.2 - Energia sonora incidente, refletida e absorvida (Tadeu <i>et al.</i> , 2010) | 7 |
| Figura 2.3 - Tempo de reverberação real e aparente (Tadeu <i>et al.</i> , 2010) | 9 |
| Figura 2.4 - Campo direto e campo reverberado para vários tipos de espaços (Isbert, 1998) | 9 |
| Figura 2.5 - Ábaco de correção do α do fabricante (adaptado de Mateus, 2017) | 12 |
| Figura 2.6 - Relação entre o TR e o EDT (Isbert, 1998) | 17 |
| Figura 3.1 - Níveis médios de intensidade de uma conversa (adaptado de Ribeiro, 2017) | 22 |
| Figura 3.2 - Assinatura acústica de um comboio percecionada a 30 metros (Patrício, 2018) | 22 |
| Figura 4.1 - Linha do Norte (Infraestruturas de Portugal, 2017a) | 33 |
| Figura 4.2 - Mapa da zona envolvente à Estação de Coimbra-B (Google Maps, 2018) | 35 |
| Figura 4.3 - Planta esquemática da sala de espera e bilheteira (dimensões em metros) | 36 |
| Figura 4.4 - Nível de pressão sonora do evento 5 por bandas de 1/3 de oitava | 38 |
| Figura 4.5 - Nível de pressão sonora do evento 6 por bandas de 1/3 de oitava | 38 |
| Figura 4.6 - Nível de pressão sonora dos restantes eventos por bandas de 1/3 de oitava | 39 |
| Figura 4.7 - T20 obtido para as várias bandas de oitava na sala de espera e bilheteira | 40 |
| Figura 4.8 - EDT obtido para as várias bandas de oitava na sala de espera e bilheteira | 41 |
| Figura 4.9 - Mapa da zona envolvente à Estação de Aveiro (Google Maps, 2018) | 44 |
| Figura 4.10 - Planta esquemática da sala de espera (dimensões em metros) | 45 |
| Figura 4.11 - Planta esquemática do piso subterrâneo (dimensões em metros) | 46 |
| Figura 4.12 - Comparação dos resultados do T20 dos três espaços da Estação de Aveiro | 48 |
| Figura 4.13 - Comparação dos resultados do EDT dos três espaços da Estação de Aveiro | 49 |
| Figura 5.1 - Variação da absorção das soluções construtivas em frequência (Ribeiro, 2017) | 55 |
| Figura 5.2 - Soluções construtivas mistas absorventes existentes no mercado (adaptado de Castelhana e Ferreira, 2011; Pladur, 2010; Silêncio, 2018) | 56 |
| Figura 5.3 - TR após aplicação das soluções no teto da sala de espera e bilheteira | 59 |
| Figura 5.4 - TR após aplicação das soluções na parede frontal da sala de espera e bilheteira | 59 |
| Figura 5.5 - TR após aplicação das soluções no teto da sala de espera | 61 |
| Figura 5.6 - TR após aplicação das soluções na parede frontal da sala de espera | 61 |
| Figura 5.7 - TR após aplicação das soluções no teto do átrio nascente | 63 |
| Figura 5.8 - TR após aplicação das soluções na parede do átrio nascente | 63 |

ÍNDICE DE QUADROS

| | |
|--|----|
| Quadro 2.1 - Valores da curva de ponderação A por bandas de 1/3 de oitava | 13 |
| Quadro 2.2 - Relação entre o STI/RASTI, % ALCons e o parâmetro subjetivo correspondente (adaptado de Isbert, 1998) | 18 |
| Quadro 3.1 - Capacidade de absorção de uma pessoa em Sabins (adaptado de Isbert, 1998) | 20 |
| Quadro 3.2 - TR limite para espaços de uso comunitário e de circulação | 25 |
| Quadro 3.3 - Classificação dos espaços de restauração relativamente à exposição ao ruído (adaptado de Lebo <i>et al.</i> , 1994) | 27 |
| Quadro 3.4 - Relação entre o RASTI e a inteligibilidade e privacidade da palavra | 27 |
| Quadro 3.5 - TR exigido pela lei espanhola (adaptado de Documento Básico HR, 2009) | 28 |
| Quadro 3.6 - Valores ideais propostos para os espaços em análise | 28 |
| Quadro 3.7 - Valores ideais para o RASTI (adaptado de Li <i>et al.</i> , 2016) | 31 |
| Quadro 4.1 - Dimensões da sala de espera e bilheteira da Estação Ferroviária de Coimbra-B36 | |
| Quadro 4.2 - Registos de ruído efetuados na plataforma exterior | 37 |
| Quadro 4.3 - Registos de ruído efetuados na sala de espera e bilheteira | 37 |
| Quadro 4.4 - Eventos percecionados na plataforma relacionados com a passagem de comboios e respetivo L_{Aeq} (dB(A)) | 38 |
| Quadro 4.5 - Valores de T20 obtidos na sala de espera e bilheteira | 39 |
| Quadro 4.6 - Comparação do valor de TR obtido e o exigido na legislação portuguesa | 40 |
| Quadro 4.7 - EDT obtido na sala de espera e bilheteira | 40 |
| Quadro 4.8 - Valores de D_{50} obtidos na plataforma exterior | 41 |
| Quadro 4.9 - Valores de D_{50} obtidos na sala de espera e bilheteira | 42 |
| Quadro 4.10 - Valores de RASTI e STI obtidos na plataforma exterior | 42 |
| Quadro 4.11 - Valores de RASTI e STI obtidos na sala de espera e bilheteira | 43 |
| Quadro 4.12 - Dimensões dos três espaços analisados na Estação Ferroviária de Aveiro | 46 |
| Quadro 4.13 - Registos de ruído efetuados na Estação de Aveiro com uso do sistema eletroacústico | 47 |
| Quadro 4.14 - Registos de ruído efetuados na Estação de Aveiro com uso da fonte DO6 | 47 |
| Quadro 4.15 - T20 obtido nos três espaços da Estação Ferroviária de Aveiro | 48 |
| Quadro 4.16 - Comparação dos valores de TR obtidos e o exigido na legislação portuguesa | 49 |
| Quadro 4.17 - EDT obtido nos três espaços da Estação Ferroviária de Aveiro | 49 |
| Quadro 4.18 - Valores de D_{50} obtidos na sala de espera | 50 |
| Quadro 4.19 - Valores de D_{50} obtidos na passagem subterrânea | 50 |
| Quadro 4.20 - Valores de D_{50} obtidos no átrio nascente | 51 |

| | |
|---|----|
| Quadro 4.21 - Valores de RASTI e STI obtidos na sala de espera | 51 |
| Quadro 4.22 - Valores de RASTI e STI obtidos na passagem subterrânea | 51 |
| Quadro 4.23 - Valores de RASTI e STI obtidos no átrio nascente | 51 |
| Quadro 4.24 - Relação entre o RASTI, a Privacidade e a Inteligibilidade | 52 |
| Quadro 5.1 - Variação do coeficiente de absorção em frequência de diferentes soluções construtivas mistas (adaptado de Castelhana e Ferreira, 2011; Pladur, 2010; Silêncio, 2018) | 57 |
| Quadro 5.2 - Variação de TR em bandas de oitava após aplicação das soluções | 58 |
| Quadro 5.3 - Valor de $TR_{\text{médio}}$ para as bandas de 500 Hz, 1 kHz e 2 kHz | 59 |
| Quadro 5.4 - Variação do nível de ruído com a aplicação dos sistemas construtivos | 60 |
| Quadro 5.5 - Variação de TR em frequência após aplicação das soluções na sala de espera | 60 |
| Quadro 5.6 - Valor de $TR_{\text{médio}}$ para as bandas de 500 Hz, 1 kHz e 2 kHz | 61 |
| Quadro 5.7 - Variação do nível de ruído com a aplicação das soluções | 62 |
| Quadro 5.8 - Variação de TR em frequência após aplicação das soluções no átrio nascente | 62 |
| Quadro 5.9 - Valor de $TR_{\text{médio}}$ no átrio nascente para as bandas de 500 Hz, 1 kHz e 2 kHz | 64 |
| Quadro 5.10 - Variação do nível de ruído com a aplicação das soluções no átrio nascente | 64 |

ÍNDICE DE FOTOGRAFIAS

| | |
|--|----|
| Fotografia 4.1 - Posicionamento do microfone e da fonte DO6 na sala de espera e bilheteira | 36 |
| Fotografia 4.2 - Posicionamento do equipamento na sala de espera | 44 |
| Fotografia 4.3 - Posicionamento do equipamento na passagem subterrânea | 45 |
| Fotografia 4.4 - Posicionamento do equipamento no átrio nascente | 46 |

SIMBOLOGIA

- % ALCons - Percentagem de Perda de Articulação
- A - Absorção Sonora do Espaço em m^2
- A - Área de Absorção Sonora Equivalente em m^2
- A_0 - Área de Absorção Sonora Total do Recheio do Espaço em m^2
- A_p - Absorção Total dos Utentes do Espaço em Sabins
- A_{pp} - Absorção de uma Pessoa em Pé ou Sentada em Sabins
- A_{total} - Absorção Total do Espaço em Sabins
- D_{50} - Definição da Palavra em %
- $D_{50 (500Hz, 2kHz)}$ - Definição Média da Palavra nas Frequências de 500 Hz e 2 kHz em %
- $E_{absorvida}$ - Energia Sonora Absorvida em J
- EDT - Tempo de Reverberação Mais Curto em s
- EDT médio (500, 1k, 2k (Hz)) - Tempo de Reverberação Mais Curto Médio para as Bandas de Oitava Cenradas nas Frequências de 500, 1k e 2k Hz em s
- $E_{incidente}$ - Energia Sonora Incidente em J
- L_{Aeq} - Nível Sonoro Contínuo Equivalente em dB(A)
- $L_{Ar,nT}$ - Nível de Avaliação Padronizado em dB
- L_{eq} - Nível Sonoro Contínuo Equivalente em dB
- L_I - Nível de Intensidade Sonora em dB
- $L_{máx}$ - Valor Máximo de Ruído Registrado num Sinal Acústico em dB
- L_w - Nível de Potência Sonora da Fonte em dB
- m - Coeficiente de Atenuação do Som no Ar em m^{-1}
- N - Número de Pessoas
- Q - Coeficiente de Direcionalidade da Fonte Sonora
- R - Constante do Local em m^2
- r - Distância entre a Fonte Sonora e o Recetor em m
- RASTI - Índice de Transmissão Rápida de Linguagem em %
- S_i - Área da Superfície ou do Material i em m^2
- S_p - Superfície Ocupada pelos Utentes do Espaço em m^2
- STI - Índice de Transmissão de Linguagem em %
- T_5 - Intervalo de Tempo Onde se Registam Valores <5 dB de $L_{máx}$ em s
- T60 – Tempo de Reverberação para 60 dB de Decaimento em s
- TR – Tempo de Reverberação em s

$TR_{\text{médio}}$ (500, 1k, 2k (Hz)) - Tempo de Reverberação Médio para as Bandas de Oitava Centradas nas Frequências de 500, 1k e 2k Hz em s

T20 - Tempo de Reverberação para 20 dB de Decaimento em s

T30 - Tempo de Reverberação para 30 dB de Decaimento em s

T40 - Tempo de Reverberação para 40 dB de Decaimento em s

TR_{final} - Tempo de Reverberação Final em s

TR_{inicial} - Tempo de Reverberação Inicial em s

$TR_{\text{máximo}}$ - Tempo de Reverberação Máximo Previsto pela Legislação em s

V - Volume do Espaço em m^3

α - Coeficiente de Absorção Sonora

$\alpha_{\text{fabricante}}$ - Coeficiente de Absorção Sonora do Fabricante

α_i - Coeficiente de Absorção Sonora da Superfície ou do Material i

$\alpha_{\text{médio}}$ - Coeficiente de Absorção Sonora Médio

α_p - Coeficiente de Absorção Unitário dos Utentes do Espaço

α_{Sabine} - Coeficiente de Absorção Sonora Obtido pela Fórmula de Sabine

ΔL - Variação do Nível de Ruído Percecionado num Dado Espaço

ABREVIATURAS

IC - Intercidades

NAQ - Nacional Alta Qualidade

NC - *Noise Criteria*

NCB - *Balanced Noise Criteria*

NR - Nacional Regional

NR - *Noise Rating*

RC - *Room Criteria*

RF - Ruído de Fundo

RGR - Regulamento Geral do Ruído

RRAE - Regulamento dos Requisitos Acústicos de Edifícios

TR - Tempo de Reverberação

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento Geral

Assistir à evolução da sociedade, ao longo dos anos, é sinónimo de observação das crescentes exigências relativamente à sua qualidade de vida, passando esta pelo conforto acústico dos vários espaços utilizados. A Acústica é um ramo da Física que, apesar de abordado desde as primeiras civilizações, só ganha relevância no século XX (1868 a 1919), através do físico Wallace Clement Sabine. Após várias experiências na Universidade de Harvard, Sabine conclui que o tempo de reverberação é dos aspetos mais condicionantes no ambiente sonoro de uma sala. Ainda assim, esta preocupação acústica direciona-se maioritariamente para locais como auditórios e salas de espetáculo, tendo sido necessária a criação do conceito de acústica de edifícios para ampliação do campo de estudo (Moreira, 2017).

Segundo Braga (2014), uma grande percentagem do futuro da construção civil passa pela reabilitação de edifícios e, conseqüentemente, pelo tratamento acústico de espaços existentes. A reabilitação acústica revela-se mais complicada que a realização de projetos acústicos de novas construções, não se adaptando o plano arquitetónico às condições acústicas necessárias, mas, sim, a acústica ao edificado existente. O autor considera ainda que espaços de circulação com muitos utilizadores, como as estações ferroviárias, se revelam mais desafiantes, uma vez que apresentam, usualmente, grandes dimensões e elevada reverberação (Braga, 2014).

Tendo conhecimento que as primeiras estações ferroviárias datam dos séculos XIX e XX e que, nomeadamente, em Portugal, a primeira gare provisória é inaugurada em 1856, em Lisboa-Santa Apolónia, é fácil concluir que muitas delas não estão dotadas de boas condições acústicas. Mesmo nas estações mais recentes, não existe ainda muita sensibilidade e preocupação, relativamente aos seus projetos acústicos, na medida em que se encaram estes locais como meros pontos de passagem.

Porém, tal como afirma IP Património (2014), as estações ferroviárias são, cada vez mais, espaços abertos dotados de zonas comerciais, que possibilitam ao utente um leque de serviços e de equipamentos. Estes vêm contribuir para a acessibilidade, funcionalidade, conforto, segurança e experiência do utilizador e, conseqüentemente, para a exigência de um ambiente acústico aprazível.

1.2 Objetivos da Dissertação

Dada a importância da acústica percebida nas estações ferroviárias, condicionante à experiência dos seus utilizadores e ainda pouco explorada, esta dissertação teve como objetivo aliar uma revisão bibliográfica do tema a uma caracterização acústica de duas estações ferroviárias portuguesas.

Primeiramente, revelou-se imprescindível realizar uma pesquisa aprofundada de conceitos e definições ao nível da acústica de edifícios e, ainda que superficialmente, no âmbito da acústica exterior. Esta pesquisa, aliada à revisão bibliográfica de outros estudos de caso e aos documentos legais utilizados em cada um, serviu de ponto de partida ao desenvolvimento da dissertação e, no seu término, contribuiu para as comparações e devidas conclusões. Dada a inexistência de trabalhos relacionados com o ambiente acústico das estações, optou-se por realizar uma revisão bibliográfica de outros espaços comunitários e de circulação.

Finda a primeira fase, o objetivo da presente dissertação passou pela caracterização de duas estações ferroviárias portuguesas: Aveiro e Coimbra-B. A escolha destes espaços não foi arbitrária. Com o intuito de tornar o estudo mais completo optou-se por analisar uma estação mais recente, a de Aveiro, inaugurada em 2005, e a de Coimbra-B, inaugurada em 1864. Os ensaios foram realizados em várias zonas de circulação exteriores e interiores, nomeadamente nas salas de espera, tendo como base a Norma ISO 3382-1. Com estas medições calcularam-se alguns parâmetros de qualidade sonora como o TR, o D₅₀, o RASTI e o STI, bem como o ruído ambiente percebido. Posteriormente, compararam-se os seus valores com os regulamentares e com os de outros estudos de caso mencionados na primeira fase.

No final, como se concluiu proveitoso e necessário, face aos resultados obtidos em determinados espaços de cada estação, definiram-se, genericamente, algumas soluções construtivas que pudessem melhorar a experiência acústica dos utilizadores.

1.3 Organização da Dissertação

A presente dissertação encontra-se dividida em seis capítulos, sendo o primeiro a atual introdução.

O segundo apresenta conceitos e definições importantes ao tema da dissertação, nomeadamente, ao nível do condicionamento acústico de edifícios e da acústica exterior. Desta forma, se explanam as bases teóricas do corpo do presente trabalho.

O terceiro capítulo, na ausência de estudos acústicos de estações ferroviárias, reúne outros dedicados a diferentes tipos de espaços, mas que podem ser relevantes e interessantes, uma vez que alguns autores defendem a inserção das estações no grupo dos espaços de circulação e de uso comunitário. Assim, o conhecimento dos parâmetros avaliados, das anomalias encontradas, das soluções apresentadas e dos documentos legais utilizados noutros estudos de caso pertencentes ao mesmo grupo, é um bom ponto de partida para avaliar um tipo de espaço pouco explorado.

O quarto capítulo revela-se como o mais importante da presente dissertação, por se referir, em particular, às estações ferroviárias analisadas – Aveiro e Coimbra B. Após um enquadramento histórico e uma apresentação da rede ferroviária portuguesa, explicam-se as metodologias seguidas e os equipamentos utilizados. Seguidamente caracterizam-se as duas estações e expõem-se as medições efetuadas e os respetivos resultados de cada uma.

O quinto capítulo desta dissertação aparece no seguimento dos resultados obtidos em vários espaços das estações avaliadas. A irregularidade de alguns parâmetros de qualidade sonora, nomeadamente do tempo de reverberação, leva ao cálculo e à proposta de algumas soluções construtivas.

O sexto e último capítulo destina-se às principais conclusões retiradas aquando a elaboração da presente dissertação e à sugestão de possíveis estudos no âmbito do estudo acústico de estações ferroviárias.

2 CONCEITOS TEÓRICOS

2.1 O Som e o Ruído

O estudo da acústica de um determinado elemento, local ou edifício é um processo complexo e, por vezes, subjetivo, dependendo de inúmeros e variados fatores. Esta área de investigação exige a análise conjunta de três componentes fundamentais: a fonte emissora, o meio de propagação e o recetor. Por sua vez, o resultado destes introduz os conceitos de som e de ruído.

O som pode ser descrito, de forma resumida, como uma variação de pressão atmosférica produzida por uma fonte sonora transmitida através de um meio de propagação elástico (gasoso, líquido ou sólido) e percecionada por um recetor - o ouvido humano. O som é libertado sob a forma de energia, provocando estas perturbações e alterando, por sua vez, valores das variáveis de estado: massa específica, pressão e temperatura.

Diferentes temperaturas e meios de transmissão geram sons com velocidades também desiguais. São heterogeneidades de situações como estas que geram os vários fenómenos de propagação do som como a difração, a reflexão e a transmissão; se estes não coexistirem de forma equilibrada, pode surgir o ruído (Mateus, 2008; Tadeu *et al.*, 2010).

O ruído apresenta-se como um som indesejável ou incomodativo ao recetor, capaz de perturbar o seu bem-estar físico ou psicológico. Porém, esta é uma definição muito subjetiva, na medida em que a sensibilidade auditiva não é igual para todos; existe sempre a dependência de quem ouve, do local onde ouve e do momento em que ouve. A gama audível, definida como a variação em frequência em que o ouvido humano tem sensibilidade, oscila em média entre os 20 Hertz (Hz) e os 20 kiloHertz (kHz), a que corresponde uma variação em amplitude de 20 microPascal (μPa) a 20 Pascal (Pa) – Figura 2.1. Todavia, a aptidão do homem para a captação das ondas sonoras varia nestas duas grandezas. Por exemplo, para frequências muito baixas (infrassons) ou muito elevadas (ultrassons), a sensibilidade auditiva reduz significativamente (Mateus, 2008; Tadeu *et al.*, 2010).

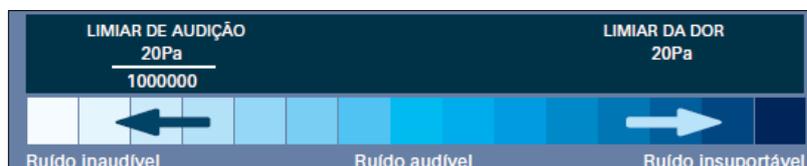


Figura 2.1 - Gama audível do ouvido humano (Instituto do Ambiente (IA), 2004)

2.2 Acústica Exterior

Avaliar certos espaços, como os das estações ferroviárias, exige o conhecimento de conceitos acústicos, não só ao nível interior dos edifícios, mas também ao nível exterior. A diversidade e simultaneidade construtiva nos ambientes exteriores e interiores requerem uma compreensão acústica mais vasta do que nos edifícios correntes.

Segundo Patrício (2014), é indispensável ter-se bem presente os conceitos das duas vertentes, na medida em que a acústica no exterior é analisada e avaliada de modo diferente relativamente à acústica no interior. Porém, existe uma inter-relação entre os aspetos acústicos de cada meio.

O ambiente exterior apresenta-se como um meio muito heterogéneo, existindo, por um lado, diversas fontes sonoras e, por outro, vários fatores que podem contribuir para a sua atenuação ou propagação: a densidade, a temperatura, o vento e a humidade não são constantes e uniformes ao longo do tempo e afetam diretamente a propagação das ondas sonoras. O seu efeito de atenuação é difícil de prever. Teoricamente, no exterior, em campo aberto, para uma fonte pontual, tendo em consideração apenas a geometria, a diminuição do nível sonoro é 6 dB sempre que se duplica a distância à fonte. Porém, devido a várias condições, como as que foram mencionadas no início deste parágrafo, e a fenómenos de absorção e reflexão, esse valor raramente é atingido. Ainda assim, para longas distâncias, devido à dissipação da energia no ar, é possível alcançar valores superiores a 6 dB (Beranek, 1960; Tadeu *et al.*, 2010).

Mateus (2008) afirma ainda que é usual considerar-se duas grandes vertentes no estudo da Acústica Aplicada: uma associada ao campo sonoro no interior dos edifícios e outra relacionada com o ambiente acústico exterior a estes. Esta última deve ser encarada sob duas perspetivas: se a garantia de que os edifícios não são afetados pelo ruído externo é imperativa, a minimização da transmissão dos sons interiores para o exterior é igualmente necessária.

2.3 Acústica de Edifícios

O ambiente sonoro interior deve ser considerado como um parâmetro de qualidade dos edifícios, na medida em que influencia a comodidade, a saúde e o quotidiano das pessoas. A falta de conforto acústico ao ser facilmente detetável, também exige uma resposta rápida e solucionadora.

Segundo Tadeu *et al.* (2010), usualmente consideram-se três tipos de situações para a análise acústica dos edifícios e, ainda que estes não sejam completamente independentes, podem, geralmente, ser tratados como tal:

- A propagação do som entre dois espaços, separados por um obstáculo físico, denominado isolamento acústico. O sucesso deste sistema depende maioritariamente da massa e da ligação da solução construtiva de separação e direciona-se mais para locais ruidosos, em que o som produzido não deve ser transmitido a outros espaços;
- A propagação do som por via sólida devido a fenómenos de percussão (choques ou solicitações mecânicas aplicadas nos elementos construtivos) e a vibrações da estrutura;
- A propagação do som no interior de um local fechado e a tentativa de o melhorar em termos de comodidade acústica, tendo em consideração o tipo e função do espaço, designa-se condicionamento acústico (Tadeu *et al.*, 2010).

2.3.1 Modos de Propagação do Som em Espaços Fechados

O ambiente sonoro de um dado local, seja este fechado ou semifechado, resulta de dois tipos de energia: a incidente diretamente e a refletida através dos obstáculos existentes, como o pavimento, o teto e as paredes. É ainda do conhecimento geral que, enquanto a primeira depende apenas da distância do recetor à fonte, o som refletido depende também do seu trajeto e das características das superfícies onde embate. Se uma dessas propriedades for a alta absorção sonora, parte da energia não permanece no interior da sala e acaba por ser absorvida, sendo posteriormente dissipada ou transmitida para outros compartimentos – Figura 2.2 (D’Almeida, 2018; Tadeu *et al.*, 2010).

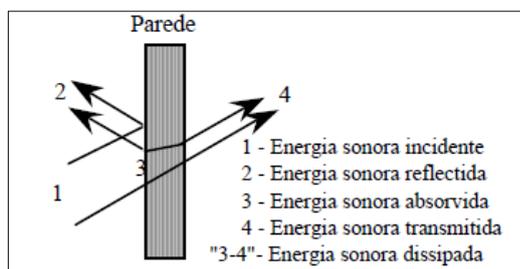


Figura 2.2 - Energia sonora incidente, refletida e absorvida (Tadeu *et al.*, 2010)

2.3.2 Campo Sonoro de um Espaço Fechado

Quando uma fonte emite determinado som, qualquer ponto desse local irá receber o sinal, gerando-se um campo sonoro. Porém, esta receção tanto pode ser feita por transmissão direta emissor-recetor, associando-se a um campo direto, como por propagação indireta devido a fenómenos de reflexão sonora, criando um campo reverberado. As reflexões nos diferentes obstáculos fazem-se segundo a Lei da Reflexão de *Snell*: “ângulo de incidência igual ao ângulo de reflexão” (Braga, 2014; Isbert, 1998).

O campo direto e o campo reverberado não são função dos mesmos parâmetros. Enquanto o campo direto deriva de ondas diretas e depende da distância à fonte sonora e do coeficiente de direccionalidade da fonte sonora (Q), o campo reverberado advém de ondas refletidas e varia com a absorção sonora do espaço (A) – Equações (1) e (2) - (Braga, 2014).

$$L_I = L_W + 10 \log \left(\frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right) \quad (1)$$

com:

L_I - nível de intensidade sonora em dB

L_W - nível de potência sonora da fonte (dB)

Q - coeficiente de direccionalidade da fonte sonora

r - distância entre a fonte sonora e o recetor (m)

R - constante do local (m^2)

$$R = \frac{A}{1 - \alpha_{\text{médio}}} \quad (2)$$

com:

A - absorção sonora do espaço

$\alpha_{\text{médio}}$ - coeficiente de absorção sonora médio

2.3.3 Coeficiente de Absorção

Parte da energia sonora emitida num dado espaço embate nas superfícies existentes, sendo associada a fenómenos de reflexão. A restante ou é transmitida para outros compartimentos ou é absorvida por esses mesmos obstáculos. Surge, assim, o conceito de coeficiente de absorção sonora (α) que define a relação entre a energia sonora absorvida ($E_{\text{absorvida}}$), num dado intervalo de tempo, e a energia sonora incidente ($E_{\text{incidente}}$) nos obstáculos – Equação (3). As quantidades de energia expressam-se em Joules. É uma propriedade que determinados materiais têm para transformar a energia sonora, que incide neles, noutra tipo de energia, como a térmica. Segundo Braga (2014), o coeficiente de absorção sonora depende tanto do ângulo de incidência como da frequência da onda sonora (Braga, 2014; Ribeiro, 2017).

$$\alpha = \frac{E_{\text{absorvida}}}{E_{\text{incidente}}} \quad (3)$$

com:

α – coeficiente de absorção

$E_{\text{absorvida}}$ – energia sonora absorvida (J)

$E_{\text{incidente}}$ – energia sonora incidente (J)

O valor do coeficiente de absorção sonora varia entre 0 e 1, sendo a qualidade de reflexão inversamente proporcional a este parâmetro. Um material é considerado acusticamente absorvente quando obtém um coeficiente superior a 0,5. A absorção sonora média de um dado espaço é a grande responsável pelo seu tempo de reverberação (Braga, 2014; Ribeiro, 2017).

2.3.4 Tempo de Reverberação

Analisar a qualidade acústica de um espaço fechado é um processo complicado, devido não só à complexidade dos seus campos sonoros mas também à impressão subjetiva de cada recetor. Esta relação entre as sensações de cada ouvinte e os fenómenos físicos acústicos denomina-se de psico-acústica. Através desta área de estudo, é possível concluir que o efeito mais reportado pelos recetores é o da reverberação. Este fenómeno, segundo o conceito de acústica geométrica, define-se como o som refletido múltiplas vezes nas fronteiras de um espaço e traduz-se através do parâmetro Tempo de Reverberação (TR) (Isbert, 1998).

O TR, também designado T60, define-se como o intervalo de tempo necessário para se verificar um decréscimo do nível sonoro em 60 dB e, devido à sua simplicidade e eficácia, passou a ser

o parâmetro mais utilizado na avaliação da qualidade acústica interior de locais fechados – Figura 2.3 (Tadeu *et al.*, 2010).

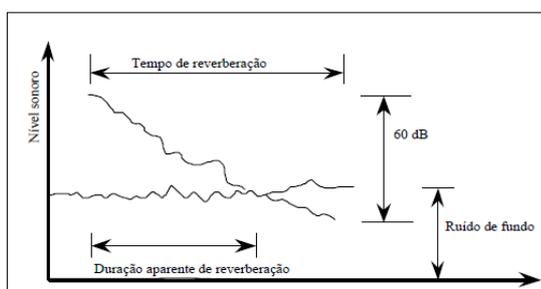


Figura 2.3 - Tempo de reverberação real e aparente (Tadeu *et al.*, 2010)

Para garantir essa qualidade é necessário controlar a reverberação do espaço, existindo estudos com valores padronizados para determinados tipos de salas e uma classificação destas: são “acusticamente vivas” se forem muito reverberadas e “acusticamente mortas” se forem pouco. Ainda assim, na prática essa redução de 60 dB nem sempre é conseguida devido ao ruído de fundo elevado; apenas é possível obter uma duração aparente da reverberação, sendo esta inferior ao TR real – Figura 2.4 (D’Almeida, 2018; Ribeiro, 2017).

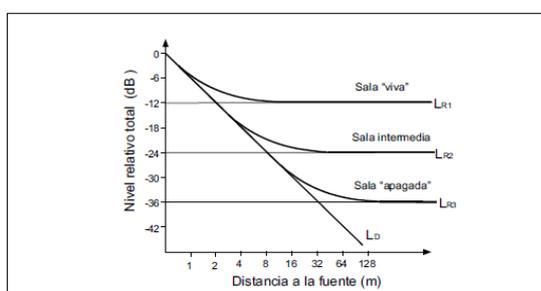


Figura 2.4 - Campo direto e campo reverberado para vários tipos de espaços (Isbert, 1998)

Nestas situações, a determinação de um tempo de reverberação real exige a utilização de outros processos de cálculo como o Método Tradicional e o Método de Schroeder:

Método Tradicional: Através de uma fonte sonora controlada é criado um campo sonoro e, após a interrupção súbita, em cada banda de frequências, é medida a diminuição do nível sonoro. Faz-se posteriormente o registo gráfico com prolongamento aproximado das retas de queda do nível sonoro (D’Almeida, 2018).

Método de Schroeder: Método que se revela mais rápido e exato que o descrito anteriormente. Neste, são emitidos vários pulsos de ruído, com conteúdos em frequência diferentes, mas ricos nas várias bandas. A medição é feita com auxílio de todos os equipamentos necessários (analisador/sonómetro e cabo de ligação) em pelo menos três pontos do espaço, com posterior cálculo da média aritmética dos resultados obtidos. Quando os decréscimos do nível são inferiores a 60 dB, é necessário considerar decaimentos menores: 40 dB (T40), 30 dB (T30) e 20 dB (T20) (D’Almeida, 2018).

Ainda que, analiticamente, o TR possa ser obtido através de várias fórmulas, como as de Eyring e de Millington, a mais utilizada é proposta por Wallace Sabine. Para espaços de pequeno volume indica a Equação (4), mas quando a volumetria é maior, as frequências são altas e a humidade relativa relevante apresenta a Equação (5). Esta considera a atenuação do som no ar (D’Almeida, 2018).

$$TR = \frac{0.161 \times V}{\sum_i S_i \alpha_i} \quad (4)$$

com:

TR – tempo de reverberação em s

V – volume da sala (m³)

S_i – área da superfície i (m²)

α_i – coeficiente de absorção sonora da superfície i

$$TR = \frac{0.161 \times V}{\sum_i S_i \alpha_i + 4mV} \quad (5)$$

com:

m – coeficiente de atenuação do som no ar (m⁻¹)

2.3.5 Utilização da Fórmula de Sabine em Espaços com Elevada Absorção Sonora

A Fórmula de Sabine, apresentada no subcapítulo anterior, aplica-se a espaços de geometria regular e de baixa absorção sonora. De facto, esta equação apenas é válida para valores inferiores a 0,1 e com distribuição quase uniforme das superfícies mais absorventes. Em outro tipo de zonas, com elevada absorção, os resultados de Sabine apenas se aproximam dos reais se se considerarem valores inferiores aos obtidos em laboratório. As restantes fórmulas, como as de Eyring e de Millington, ainda que sejam comprovadamente mais adequadas, conduzem também, em certas situações, a erros significativos (Mateus, 2017; Mateus, Marinho e Pereira, 2012).

Desta forma, Mateus, Marinho e Pereira (2012) apresentam um estudo sobre a aplicabilidade da Fórmula de Sabine a espaços com elevada absorção sonora (superiores a 0,2), através da prévia correção dos coeficientes de absorção do fabricante (obtidos laboratorialmente pela Norma ISO 354:2003) para que se convirja para os resultados corretos. A investigação subdivide-se em duas fases comparativas. Uma primeira entre valores de TR obtidos pela fórmula de Sabine para 16 salas de pequenas e médias dimensões – Equações (6) e (7) - e outros experimentais registados *in situ*. Num segundo ponto comparam-se os primeiros resultados com uns terceiros obtidos, de maneira teórica, através de modelação numérica 3D. Para esta recorre-se ao programa de cálculo automático “*CATT – AcousticTM*” que prevê o comportamento acústico de salas através do método “*Ray Tracing*” (Mateus, Marinho e Pereira, 2012).

$$TR = \frac{0.161 \times V}{A + 4mV} \quad (6)$$

com:

A – área de absorção sonora equivalente (m²)

$$A = \sum_i S_i \alpha_i + A_0 \quad (7)$$

com:

S_i – área do material i (m²)

α_i – coeficiente de absorção sonora do material i

A₀ – área de absorção sonora total do recheio do espaço (m²)

Finalmente, é proposto um ábaco de correção dos coeficientes de absorção sonora dos fabricantes, criado por interpolação das curvas de correção de cada fase de comparação – Figura 2.5. Em suma, pode-se dizer que a proposta conduz a resultados seguros e mais realistas do que se se usasse apenas os coeficientes fornecidos pelo fabricante. Ainda assim, sugere-se que este método seja apenas utilizado em salas simples, de volume inferior a 500 m³, e em fase de projeto, para comparar o TR médio obtido com os requisitos legais exigidos (Mateus, Marinho e Pereira, 2012).

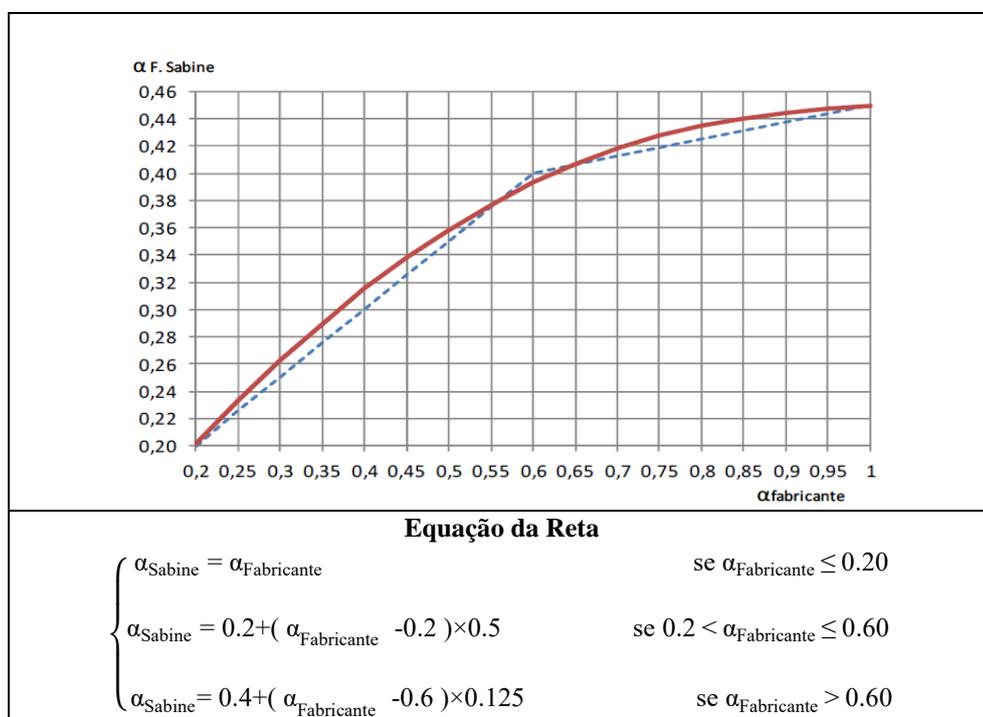


Figura 2.5 - Ábaco de correção do α do fabricante (adaptado de Mateus, 2017)

2.3.6 Ruído de Fundo

O conforto acústico e a qualidade sonora dependem também de um fenómeno recorrente: a existência de ruído de fundo (RF) ou ruído residual, que existe em muitos espaços, como as estações ferroviárias, e tem grande influência no seu ambiente acústico. Este tipo de ruído define-se como a média dos níveis de ruído mínimos registados, podendo estes ter as mais variadas origens. Para Ribeiro (2017), em análise estatística dos níveis de pressão sonora, o RF é habitualmente tratado como o nível que é superado em 95 por cento do tempo de medição. Apresenta-se ainda no Regulamento Geral do Ruído, aprovado pelo Decreto-lei nº 9/2007, de 17 de janeiro, capítulo I, artigo 3º, como “o ruído ambiente a que se suprimem um ou mais ruídos particulares, para uma situação determinada” (Instituto do Ambiente (IA), 2004; RGR, 2007; Ribeiro, 2017).

Determina-se através do nível sonoro equivalente do local (L_{eq}), num dado intervalo de tempo, e é expresso em dB. Contudo, o facto do ouvido humano ser pouco sensível aos infra e ultrassons, leva à perda de credibilidade dos níveis de ruído expressos em dB. Recorre-se assim a um coeficiente de ponderação dependente da frequência – Quadro 2.1 – que permite a

descrição correta da sensibilidade auditiva do Homem e que altera a nomenclatura do RF para L_{Aeq} em dB(A) (Instituto do Ambiente (IA), 2004; Ribeiro, 2017).

Quadro 2.1 - Valores da curva de ponderação A por bandas de 1/3 de oitava
(adaptado de Tadeu *et al.*, 2010)

| | | | | | | | | | | | |
|------------|-----------|--------------|-------------|------------|-------------|--------------|------------|------------|-------------|------------|------------|
| 50 | 63 | 80 | 100 | 125 | 160 | 200 | 250 | 315 | 400 | 500 | 630 |
| 30.2 | 26.2 | 22.5 | 19.1 | 16.1 | 13.4 | 10.9 | 8.6 | 6.6 | 4.8 | 3.2 | 1.9 |
| 800 | 1k | 1.25k | 1.6k | 2k | 2.5k | 3.15k | 4k | 5k | 6.3k | 8k | 10k |
| 0.8 | 0 | -0.6 | -1 | -1.2 | -1.3 | -1.2 | -1 | -0.5 | 0.1 | 1.1 | 2.5 |

Para além dos requisitos de cada país para o ruído de fundo existente nos diferentes tipos de espaços, existe outra forma de avaliar a incomodidade dos utentes. As curvas de incomodidade utilizam-se para classificar ou quantificar a perturbação causada pelo RF, em determinada situação, através dos seus níveis de pressão sonora. São mais utilizadas para caracterizar ambientes em que persiste ruído contínuo e variável e os seus resultados são mais credíveis se obtidos à altura do ouvido humano. As curvas mais conhecidas denominam-se *Noise Criteria* (NC), *Noise Rating* (NR), *Room Criteria* (RC) e *Balanced Noise Criteria* (NCB) (Ribeiro, 2017).

2.3.7 Inteligibilidade e Privacidade da Palavra

Em espaços como as salas de espera das estações ferroviárias, em que a clara transmissão das mensagens e o seu entendimento são imprescindíveis, a qualidade sonora do ambiente só é atingida se se tiver em consideração a inteligibilidade e a privacidade da palavra. Relativamente à inteligibilidade, esta entende-se, para Macedo (2015), como o grau de compreensão das palavras transmitidas entre um emissor e um recetor, num determinado local. A inteligibilidade depende das características do espaço físico envolvente, como o ruído de fundo e o tempo de reverberação, bem como das propriedades da fonte.

Com o intuito de avaliar este aspeto, surgem vários parâmetros acústicos, como o Índice de Transmissão de Linguagem (STI) e o Índice de Transmissão Rápida de Linguagem (RASTI). A inteligibilidade do discurso num dado espaço será tanto maior quanto mais elevados forem estes valores (Macedo, 2015).

Porém, alcançar um ambiente sonoro aprazível, exige a análise conjunta da inteligibilidade com a privacidade. Contrariamente à primeira, a privacidade de uma conversa define-se como o

controlo da exposição desta para que nem todos os utentes do espaço compreendam as mensagens ou sejam perturbados. Assim, é necessário haver um equilíbrio dos parâmetros abordados anteriormente de maneira a que tanto a inteligibilidade como a privacidade sejam conseguidas (Macedo, 2015; Ribeiro, 2017).

2.3.8 Relação Sinal/Ruído

A relação sinal/ruído pode ser definida como a diferença de nível entre o sinal emitido por uma fonte sonora num dado espaço e o ruído de fundo percebido nesse mesmo. Contudo, segundo Pereira (2015), existe uma discordância que deve ser considerada e equilibrada: a diminuição do ruído de fundo provoca uma melhor inteligibilidade, mas diminui a privacidade. Se, por sua vez, o ruído de fundo for muito elevado, a perceptibilidade fica reduzida, mas a intimidade aumenta (Pereira, 2015; Ribeiro, 2017).

2.3.9 Condicionamento Acústico Interior

No âmbito do condicionamento acústico interior, visa-se caracterizar o campo sonoro de espaços fechados; através do controlo dos sons produzidos, bem como da sua propagação, pretende-se adequar o ambiente acústico do recinto às suas características e ao seu volume (Bastos, 2010; Mateus, 2008). Desta forma, Bastos (2010) estabelece alguns dos objetivos principais desta área: melhorar a qualidade auditiva, assegurar a distribuição do som a todos os pontos da sala, evitar os ruídos de fundo elevados (privilegiando o som útil), adequar a reverberação às funções do recinto e à sua volumetria e evitar anomalias acústicas, como os fenómenos relacionados com os ecos.

Dependendo da forma e geometria do espaço, do tipo de revestimentos interiores e do seu recheio, a correção acústica pode-se tornar bastante complexa. Devido a esta heterogeneidade de situações, estão previstas três teorias que abordam o condicionamento acústico de forma diferente:

Teoria da Acústica Estatística: Teoria que se baseia numa probabilidade igual da distribuição das velocidades e dos raios sonoros. Bastante simples e muito utilizada em locais fechados, mas nem sempre conduzindo a resultados exatos; em frequências muito baixas e para espaços de geometria irregular com grande heterogeneidade de superfícies, a Teoria Estatística torna-se errónea (Mateus, 2008; Silva, 2012).

Teoria da Acústica Geométrica: Teoria simplificada que geralmente só se revela válida nas frequências altas ou em espaços de grandes dimensões onde quase não se percebe o campo

sonoro difuso. Baseia-se nas leis da ótica geométrica e no Princípio de *Fermat* que afirma que qualquer onda com velocidade constante e sem obstáculos se propaga em linha reta pelo caminho mais curto (Mateus, 2008; Silva, 2012).

Teoria da Acústica Ondulatória: A Teoria Ondulatória é a mais rigorosa das três apresentadas. Esta permite determinar as frequências próprias de vibração de um espaço que, por sua vez, identificam a forma de propagação da onda sonora. Ainda assim, a complexidade leva apenas à sua utilização quando a caracterização da sala só se consegue explicar pelo carácter ondulatório do som (Mateus, 2008; Silva, 2012).

2.3.10 Parâmetros de Qualidade Sonora

Ainda que, no passado, o tempo de reverberação fosse considerado o fator predominante, para a caracterização acústica de um espaço, atualmente, existem inúmeros parâmetros e critérios alternativos ou complementares. Estes são utilizados de acordo com a especificidade e as características do lugar em análise, sendo que, em alguns casos, se torna imprescindível introduzir a distinção entre parâmetros objetivos e parâmetros subjetivos. Pereira (2010) afirma que, apesar de ainda não existir uma correspondência rigorosa entre valores objetivos e valores subjetivos, se está a evoluir nesse sentido. Também os métodos e critérios de análise a novos parâmetros estão a tornar-se mais rigorosos e consensuais, o que é justificado pela publicação da Norma ISO 3382 (Pereira, 2010).

Parâmetros Subjetivos: Em espaços como auditórios, estúdios, salas de concertos ou igrejas, que dependem e influenciam o estado psicológico dos seus utentes, uma análise acústica objetiva não é suficiente. Desta forma, surgem os parâmetros subjetivos que, relacionados com a sensibilidade e perceção dos utilizadores, permitem uma análise qualitativa do local e uma caracterização acústica final mais completa.

Apesar da abordagem subjetiva não ser a mais útil em estações ferroviárias, por não existir preocupação em apreciar o seu ambiente acústico nem haver uma opinião pessoal formada no que respeita à sua acústica, é importante conhecer os parâmetros desta natureza. Tanto Pereira (2010) como Macedo (2015) apresentam os seguintes pontos: ruído de fundo, intensidade do som, clareza do discurso musical, reverberação, eco, intimidade, direcionalidade, envolvimento e equilíbrio tímbrico. Já Silva (2012) aborda parâmetros como a vivacidade, o calor, a clareza, a definição, o brilho e a impressão espacial.

Ainda que uma análise subjetiva possa levantar problemas devido à falta de precisão, esta é adotada em vários estudos, como um complemento de todo o trabalho. A título de exemplo,

indicam-se Carvalho e Nascimento (2010), Carvalho e Garcia (2012) e Ortins (2016). Todos eles recorrem a inquéritos aos utentes dos espaços em análise, com o intuito de comparar as respostas dos questionários com os valores objetivos obtidos.

Parâmetros Objetivos: Como já foi mencionado no início do subcapítulo 2.3.10, existe um vasto leque de parâmetros de qualidade sonora para caracterizar objetivamente um espaço fechado. Segundo Macedo (2015) estes têm como objetivo quantificar o ambiente acústico de um local ou recinto, através de equipamentos que recebem e processam um dado sinal.

Mateus e Pereira (2017) afirmam que estes parâmetros procuram quantificar a resposta subjetiva dos utentes dos espaços e que podem ser avaliados, tanto em fase de projeto, recorrendo a modelação numérica, como após os processos construtivos, através de medições acústicas *in situ*. Estas permitem uma caracterização do campo sonoro interior e uma determinação dos parâmetros requeridos, através de normas adequadas como a Norma ISO 3382: 1,2,3.

Para o presente estudo recorre-se à parte 1 da Norma ISO 3382, pelo que se julga pertinente apresentar alguns parâmetros objetivos aí utilizados:

Tempo de Reverberação (TR) – O tempo de reverberação, já apresentado no ponto 2.3.4, define-se como o intervalo de tempo necessário para que o nível de pressão sonora, num espaço fechado, diminua 60 dB após a interrupção do sinal (Tadeu *et al.*, 2010).

Nos estudos de caso, analisados nesta dissertação, recorre-se ao T20: tempo de reverberação calculado com base no decaimento da energia sonora entre -5 dB e -25 dB, e extrapolado para 60 dB de decaimento. Tal como afirma Mateus e Pereira (2017), existe ainda um parâmetro médio obtido a partir das bandas de oitava de 500, 1000 e 2000 Hz, a que se recorre no caso do Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios (Mateus e Pereira, 2017; RRAE, 2008).

Early Decay Time (EDT) – Também denominado Tempo de Reverberação Mais Curto ou Mais Cedro, define-se como o TR, igualmente variável em frequência, determinado para os primeiros 10 dB de decaimento. Tem um valor usualmente inferior ao T30, principalmente se existirem recetores situados em zonas com elevada absorção sonora e próximas da fonte. Ainda que o EDT esteja relacionado com a perceção da reverberação e o TR se direcione para as propriedades físicas das salas, uma comparação ente os dois parâmetros permite analisar o efeito das primeiras reflexões (as mais reportadas pelos ouvintes) – Figura 2.6 (Isbert, 1998).

Para Bastos (2010) o EDT torna-se útil por ter em conta as primeiras reflexões ocorridas no interior de um espaço, aproximando-se dos aspetos sensoriais do ouvido humano. Já para Isbert (1998) este parâmetro é apropriado para distinguir a perceção nas várias posições de sala. Salienta ainda que é necessário ter cuidado com posições muito próximas da fonte para que não ocorram decaimentos abruptos.

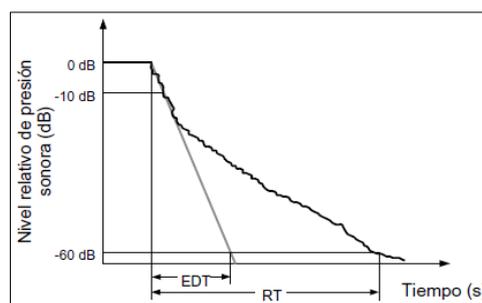


Figura 2.6 - Relação entre o TR e o EDT (Isbert, 1998)

Definição da Palavra (D_{50}) – Parâmetro que indica a relação entre a energia recebida nos primeiros 50 milissegundos (correspondente ao som direto e às primeiras reflexões) e a energia total – Equação (8). Expressa-se por bandas de frequência, em percentagem ou eventualmente de 0 a 1. Consideram-se valores aceitáveis de D_{50} a partir de 50 % e a garantia de uma perfeita inteligibilidade aos 100 %. Contudo, na prática, este último resultado é inatingível (Silva, 2012).

Todas as reflexões que o recetor capta em menos de 50 milissegundos (valor aceite por vários autores como limite para a perçetibilidade da palavra) reforçam o nível sonoro do som direto, favorecendo a inteligibilidade. Desta maneira, o D_{50} associa-se ao parâmetro subjetivo Definição (Silva, 2012). Tal como afirma Mateus e Pereira (2017), é recorrente a utilização de um valor médio, obtido através dos resultados nas oitavas de 500 Hz e 2 kHz – $D_{50} (500\text{Hz}, 2\text{kHz})$.

$$D_{50} = \frac{\int_0^{50 \text{ mseg}} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} * 100 \quad (8)$$

Rapid Speech Transmission Index (RASTI) – O Índice de Transmissão Rápida de Linguagem é um parâmetro de medição que varia de 0 % a 100 %, correspondendo o valor máximo a uma inteligibilidade perfeita, que na realidade nunca é alcançada. Foi desenvolvido por necessidade de simplificação, a partir de outro parâmetro denominado Índice de Transmissão de Linguagem – STI – que se criou para avaliar a compreensibilidade da palavra em locais ruidosos ou com reverberação. Segundo Bastos (2010), parte-se do princípio que a voz é um sinal modulado em

amplitude que deve sofrer o mínimo de deformação para que seja perceptível. Dessa forma, o STI e o RASTI expressam o grau de alteração da profundidade de modelação, devido à reverberação, que afeta apenas as altas frequências, e ao ruído de fundo, que tem influência em todas as frequências (Bastos, 2010; Mateus e Pereira, 2017; Moreira, 2017).

O STI revela-se complexo uma vez que considera as oitavas de 125 Hz a 8000 Hz, com um total de 98 índices de modelação. Já o RASTI contempla as oitavas de 500 Hz e 2000 Hz, perfazendo apenas 9 índices de modelação. Os dois parâmetros podem ser obtidos experimentalmente ou através de modelos de previsão para diferentes relações sinal/ruído. Nos estudos de caso da presente dissertação, recorre-se à primeira opção para determinar o RASTI: uso de uma fonte que emite um sinal modulado e de um recetor que avalia a distorção desse sinal. Neste tipo de medições, o resultado final pode depender conjuntamente das características do espaço, da potência sonora usada e do ruído de fundo (Bastos, 2010; Mateus e Pereira, 2017; Moreira, 2017).

O RASTI pode associar-se ao parâmetro referente à percentagem de perda de articulação (%ALCons) e a um parâmetro subjetivo correspondente – Quadro 2.2. Relaciona-se ainda com o D_{50} que, apesar de ter uma escala mais largada, lhe é proporcional. Desta forma, verificam-se geralmente as seguintes condições: para valores de RASTI menores que 60 % $D_{50} < \text{RASTI}$, mas se o RASTI for maior que 70 %, $D_{50} > \text{RASTI}$ (Bastos, 2010; Isbert, 1998; Mateus e Pereira, 2017; Moreira, 2017).

Quadro 2.2 - Relação entre o STI/RASTI, % ALCons e o parâmetro subjetivo correspondente (adaptado de Isbert, 1998)

| % ALCons (%) | STI/RASTI | Parâmetro Subjetivo |
|--------------|-------------|---------------------|
| 1.4 – 0 | 0.88 - 1 | Excelente |
| 4.8 – 1.6 | 0.66 - 0.86 | Boa |
| 11.4 - 5.3 | 0.5 - 0.64 | Aceitável |
| 24.2 - 12 | 0.36 - 0.49 | Pobre |
| 46.5 - 27 | 0.24 - 0.34 | Má |

3 A PROBLEMÁTICA DA ACÚSTICA NAS ESTAÇÕES FERROVIÁRIAS

3.1 As Estações como Espaços de Uso Comunitário e de Circulação

O número de metodologias que existe para a categorização acústica de um espaço é proporcional ao número de autores que sobre o assunto se debruça, o que significa afirmar a diversidade da sua classificação.

Para Tamanini *et al.* (2008), um dos fatores preponderantes para a conceção de um local é a definição para o fim a que se destina, uma vez que existe a distinção clara em termos de exigências entre salas de música e salas para palavra.

Já Isbert (1998) faz a diferenciação entre espaços de uso comunitário, zonas de uso desportivo e salas de aulas/conferências. Na primeira tipologia inserem-se restaurantes, refeitórios, bibliotecas, aeroportos e estações ferroviárias. Os teatros e salas de concertos apresentam-se como casos particulares de utilização comunitária.

Por sua vez, Braga (2014) classifica as estações ferroviárias como zonas de circulação. Ainda assim, zonas deste tipo não se restringem apenas ao conceito de mobilidade, podendo estar associadas tanto a áreas exteriores como interiores. As ruas e praças, como espaços exteriores, para além da sua função principal de circulação, caracterizam-se por serem locais de convívio e de encontro. Nas áreas interiores, para além dos centros comerciais, museus, hospitais e escolas, inserem-se as estações de transporte de passageiros e os corredores de circulação de zonas de embarque, que tanto funcionam como locais de passagem como de encontro de muitos utentes (Braga, 2014; Isbert, 1998; Tamanini *et al.*, 2008).

A legislação portuguesa, no Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios, republicado pelo Decreto-Lei n.º 96/2008, de 9 de junho, apesar de não incluir as estações de transporte de passageiros na mesma tipologia que os espaços de restauração, os recintos desportivos ou os átrios e salas de espera de edifícios hospitalares, apresenta imposições regulamentares para o tempo de reverberação semelhantes (RRAE, 2008).

3.1.1 Características dos Espaços que Influenciam a sua Acústica

Segundo Isbert (1998), existem três objetivos a garantir nos espaços comunitários: a existência de conforto acústico, a garantia de uma correta inteligibilidade e, caso haja sistema de difusão de mensagens, assegurar que estas são perceptíveis em todos os pontos. Porém, para que estes fins sejam alcançados é necessário ter em conta os fatores que influenciam a qualidade acústica do espaço. Para Braga (2014), os mais representativos são a reverberação, a absorção, o volume e o ruído de fundo do local.

A reverberação é crescente com a refletividade das superfícies e diminui com a absorção destas. Uma reflexão excessiva, em espaços dedicados à palavra, como as salas de espera das estações ferroviárias, pode ser prejudicial e levar à perda de inteligibilidade. Assim, deve-se ter em consideração a capacidade de absorção dos vários elementos: das superfícies envolventes, do próprio ar circundante (20 a 25 % da absorção total) e dos utilizadores (Braga, 2014). A capacidade de absorção de uma pessoa depende sobretudo da sua roupa e, conseqüentemente, dos valores médios de absorção do espaço e da variabilidade de vestuário existente – Quadro 3.1.

Quadro 3.1 - Capacidade de absorção de uma pessoa em Sabins (adaptado de Isbert, 1998)

| Frequência (Hz) | 125 | 250 | 500 | 1k | 2k | 4k |
|------------------------|------|------|------|------|------|------|
| Pessoa de Pé Sem Roupa | 0.12 | 0.24 | 0.59 | 0.98 | 1.13 | 1.12 |
| Pessoa de Pé Com roupa | 0.17 | 0.41 | 0.91 | 1.30 | 1.43 | 1.47 |

Para Isbert (1998), lugares como as estações, em que a dispersão dos utentes é bastante variável, torna-se mais correto recorrer a uma absorção por pessoa em Sabins do que ao coeficiente de absorção unitário (α) – Equação (9).

$$A_p = N * A_{pp} \quad (9)$$

com:

A_p – absorção total dos utentes do espaço em Sabins

N – número de pessoas

A_{pp} – absorção de uma pessoa em pé ou sentada (Sabins)

Desta forma, a absorção total da sala é dada pela soma da absorção das superfícies com a referente aos utilizadores – Equação (10).

$$A_{\text{total}} = \sum_i S_i * \alpha_i + A_p \quad (10)$$

com:

A_{total} – absorção total do espaço em Sabins

Se ainda assim se revelar útil obter um coeficiente de absorção unitário para as pessoas, Isbert (1998) apresenta uma fórmula simples em que basta dividir A_p pela superfície ocupada – Equação (11).

$$\alpha_p = \frac{A_p}{S_p} \quad (11)$$

com:

α_p – coeficiente de absorção unitária dos utentes do espaço

S_p – Superfície ocupada pelos utentes do espaço (m^2)

Também o volume e a geometria da sala afetam o seu ambiente acústico. O primeiro relaciona-se com a quantidade de superfície absorvente e com a quantidade de ar existente. Lugares mais volumosos não podem menosprezar a absorção do ar e a humidade relativa do mesmo. Grandes edifícios, como as estações de caminho de ferro, recorrem muitas vezes a sistemas de amplificação, tentando obter uma adequada inteligibilidade. Já a geometria interfere na maior ou menor distância entre o emissor e o recetor (Braga, 2014; Isbert, 1998).

3.1.2 Principais Fontes de Ruído Existentes

As zonas comunitárias e de circulação exibem uma grande diversidade de sons que se revelam, frequentemente, incomodativos, e que geram o ruído residual. Ainda assim, Braga (2014), Pereira (2015) e Ribeiro (2017), ao avaliarem espaços diferentes, são unânimes ao mencionarem as principais fontes de ruído. Braga (2014) afirma ainda que a sua origem é de grande importância, uma vez que sons provenientes do exterior se traduzem em trabalhos de isolamento acústico e que fontes internas exigem a correção acústica do próprio espaço.

Em todas estas áreas, inclusive as estações ferroviárias, uma das principais fontes de ruído internas é a circulação e conversação das pessoas. São, geralmente, ruídos variáveis que não ultrapassam os 90 dB, quando existe utilização de objetos, e 60 dB no decorrer de uma conversa – Figura 3.1. Outro dos ruídos mais reportados é o proveniente de máquinas ou sistemas em funcionamento (Braga, 2014; Pereira, 2015; Ribeiro, 2017).

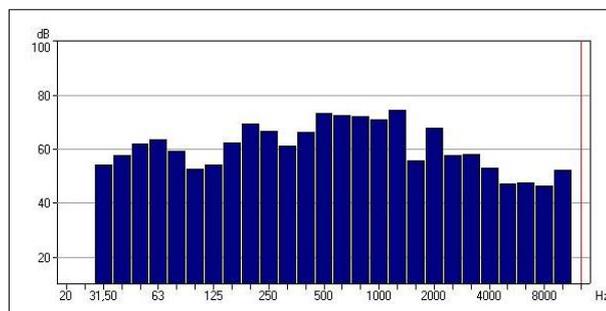


Figura 3.1 - Níveis médios de intensidade de uma conversa (adaptado de Ribeiro, 2017)

Relativamente ao ruído exterior, o tráfego rodoviário da envolvente é geralmente o principal incómodo. Porém, nas estações de comboios a rede ferroviária tem, naturalmente, um peso mais importante. Segundo Patrício (2018), fenómenos de desenvolvimento urbanístico desordenado têm feito surgir edificações demasiado próximas de linhas ferroviárias, gerando-se ambientes sonoros francamente incómodos. Partindo do pressuposto que as estações ferroviárias são as construções mais próximas das linhas férreas, a sua envolvente sonora é influenciada pela passagem de comboios.

O ruído do tráfego ferroviário apresenta uma assinatura característica composta por três fases – Figura 3.2. Primeiramente, verifica-se uma zona de crescimento acentuada, seguindo-se um patamar (T_5) onde se desenvolvem valores inferiores em 5 dB do valor máximo da série ($L_{máx}$) e, por fim, um decréscimo menos inclinado que o inicial (Patrício, 2018).

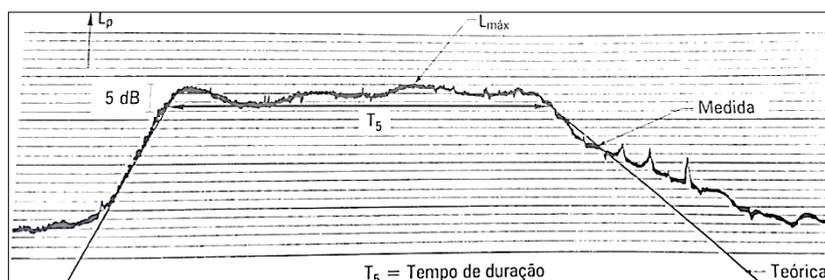


Figura 3.2 - Assinatura acústica de um comboio percecionada a 30 metros (Patrício, 2018)

Ainda que seja possível caracterizar de forma generalista o ruído ferroviário, como se apresenta na figura acima, a influência de fatores como o tipo e o tamanho do comboio, a velocidade de

circulação e a distância a que se encontra o recetor – Figura 3.3 – tornam-no um ruído global composto por várias sub-fontes:

Ruídos acidentais: Sons resultantes das travagens, dependentes da qualidade dos sistemas existentes nos comboios para o efeito; avisos sonoros que, por terem um carácter impulsivo e se situarem nas médias e altas frequências se revelam muito incomodativos; deslizamento de rodados nas curvas que ocorre habitualmente nas frequências altas e que, por isso, aparenta facilidades de controlo (Patrício, 2018).

Ruído aerodinâmico: Inerente à velocidade de circulação, sendo por isso mais frequente nos comboios que circulam a mais de 240 km/h (Patrício, 2018).

Ruído do motor: O material usado em cada comboio influencia muito o som que este gera. Os motores a *Diesel*, apesar de serem muito comuns, são os que provocam mais ruído e que têm grande expressão nas baixas frequências. Já os motores elétricos conseguem alcançar valores inferiores em 10 dB, relativamente aos *Diesel* e não têm tanto impacto nas frequências menores (Patrício, 2018).

Ruído de rolamento: Apresenta-se como o ruído mais significativo e deve-se à ação das próprias rodas e à interligação roda/carril. Ainda que seja influenciado pela velocidade de circulação, é sobretudo a qualidade dos sistemas do comboio e as irregularidades da própria linha que o fazem variar; velocidades iguais, mas sistemas muito diferentes em termos de qualidade, conseguem alterar o ruído de rolamento em 15 dB (Patrício, 2018).

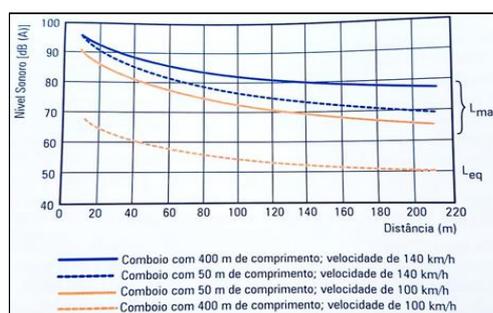


Figura 3.3 - Ruído dos vários tipos de comboios em diferentes condições (Patrício, 2018)

3.1.3 Fenómenos Acústicos Percecionados

Em espaços de circulação e comunitários é comum existirem dois fenómenos acústicos ao nível do ruído e que afetam a inteligibilidade da palavra:

Efeito Lombard: Dado a conhecer em 1911, por Étienne Lombard, é um fenómeno que ocorre pela elevação da intensidade da voz, devido ao ruído de fundo existente num espaço. Acaba por ser um reflexo involuntário das pessoas que se traduz num efeito “bola de neve”. Em 1954, foi ainda descoberto por Konn que se os níveis sonoros forem inferiores a 45 dB(A) o Efeito *Lombard* não ocorre (Braga, 2014; Ribeiro, 2017). Sendo mais frequente em espaços de restauração, é um dos fenómenos registados, a título de exemplo, por Zelem *et al.* (2016).

Efeito Cocktail Party: Descoberto em 1953 por Colin Cherry, o efeito *Cocktail Party* define-se como a capacidade que uma pessoa tem de focar a sua audição num único orador, na presença de várias conversações com o mesmo nível sonoro, criando estas um ambiente reverberante (Ribeiro, 2017). Tal como o Efeito *Lombard*, é um fenómeno bastante reportado em espaços muito frequentados, acabando mesmo por ser um dos temas principais no estudo de Li *et al.* (2016) sobre estações ferroviárias.

3.2 Legislação Nacional em Vigor

Em Portugal, a regulamentação relativa às condições acústicas é enquadrada pelo Regulamento Geral do Ruído (RGR), aprovado pelo Decreto-lei nº 9/2007, de 17 de janeiro, e em vigor desde 1 de fevereiro de 2007. Este documento tem como objetivo estabelecer, de uma maneira global, uma política de prevenção e combate ao ruído, salvaguardando a saúde e o bem-estar das pessoas.

Segundo a Agência Portuguesa do Ambiente (2008), o transporte ferroviário classifica-se como atividade ruidosa permanente, segundo a alínea a) do artigo 3º, do capítulo I, do RGR: “atividade desenvolvida com carácter permanente, ainda que sazonal, que produza ruído nocivo ou incomodativo para quem habite ou permaneça em locais onde se fazem sentir os efeitos dessa fonte de ruído, designadamente laboração de estabelecimentos industriais, comerciais e de serviços.” Poderá ainda ser definido como uma grande infraestrutura de transporte ferroviário se respeitar as características definidas na alínea f) do mesmo artigo: “o troço ou conjunto de troços de uma via-férrea regional, nacional ou internacional identificada como tal pelo Instituto Nacional do Transporte Ferroviário, onde se verificam mais de 30 000 passagens

de comboios por ano.” Deste modo, aplica-se à ferrovia o disposto no artigo 19º do mesmo regulamento (Agência Portuguesa do Ambiente, 2008; RGR, 2007).

Como complemento ao RGR, surgem outros documentos legais mais específicos. À presente dissertação, o que se revela de maior interesse é o Regulamento dos Requisitos Acústicos de Edifícios (RRAE), aprovado pelo Decreto-lei nº 129/2002, de 11 de maio, republicado pelo Decreto-lei nº 96/2008 de 9 de junho. O RRAE regimenta o conforto no interior dos edifícios, procurando uma melhoria do seu ambiente acústico e uma garantia do bem-estar e da saúde dos seus utentes.

Tal como foi abordado no subcapítulo 3.1, também o RRAE apresenta uma subdivisão dos vários tipos de espaços: cada artigo destina-se a um tipo de edifício, caracterizado pela existência de zonas consideradas de uso comunitário e de circulação. Ainda assim, os requisitos impostos, nomeadamente os do tempo de reverberação, são bastante semelhantes, incluindo os das estações de transporte de passageiros, que se encontram no artigo 10º do capítulo II. – Quadro 3.2.

O regulamento prevê, em alguns artigos, nomeadamente no artigo 10º, a associação de um fator de incerteza I às grandezas em causa, quando são realizadas avaliações *in situ*: o tempo de reverberação obtido é diminuído em 25 %, e posteriormente comparado com o limite regulamentar. Relativamente ao ruído ambiente, o RRAE não prevê nenhum limite legal para o ruído ambiente nas estações ferroviárias (RGR, 2007; RRAE, 2008).

Quadro 3.2 - TR limite para espaços de uso comunitário e de circulação
(adaptado de RRAE, 2008)

| | TR _{médio} (500, 1k, 2k (Hz)) (s) | |
|---|--|---------------------------|
| | Sistema de Difusão de Mensagens | |
| | Com | Sem |
| Artigo 6º - Edifícios Comerciais e de Serviços Refeitórios ou Recintos Públicos de Restauração | $\leq 0.15 \cdot V^{1/3}$ | |
| Artigo 7º - Edifícios Escolares Bibliotecas, Salas Polivalentes e Refeitórios | $\leq 0.15 \cdot V^{1/3}$ | |
| Artigo 8º - Edifícios Hospitalares Refeitórios | $\leq 0.15 \cdot V^{1/3}$ | |
| Átrios e Salas de Espera ($V \geq 100 \text{ m}^3$) | $\leq 0.12 \cdot V^{1/3}$ | $\leq 0.15 \cdot V^{1/3}$ |
| Artigo 10º - Estações de Transporte de Passageiros Átrios e Salas de Embarque ($V > 350 \text{ m}^3$) | $\leq 0.12 \cdot V^{1/3}$ | $\leq 0.15 \cdot V^{1/3}$ |

3.3 Estudos Acústicos Associados a Vários Espaços – Estado da Arte

3.3.1 Zonas de Restauração

As exigências dos utentes nos espaços de restauração são cada vez maiores. Aliar uma boa refeição a um espaço confortável e com boas condições de convívio é atualmente um requisito fundamental. Para além disso, é necessário ter em consideração que este tipo de lugar não se restringe apenas a cafés, bares ou restaurantes, mas também a cantinas escolares, onde crianças e jovens estão expostas grande parte dos seus dias a níveis de ruído, por vezes, significativos.

O conforto destes lugares passa por uma adequada acústica dos mesmos. Se por um lado se procura uma adequada perceção da palavra, por outro, a sua privacidade também é exigida. A caracterização do ambiente sonoro torna-se ainda mais complexa devido à variação do número de pessoas e, conseqüentemente, do tipo e número de fontes sonoras.

As características mencionadas nos parágrafos acima assemelham-se às das estações ferroviárias, nomeadamente, nas suas zonas de restauração e de espera, em que a conversação e a circulação de indivíduos são constantes, e em que existem permanentemente fontes de ruído de fundo. Esta correlação entre os vários tipos de espaços justifica o interesse de enriquecer esta dissertação com a apresentação de alguns estudos de caso realizados em cantinas e restaurantes.

Cantinas e Refeitórios: Como exemplos claros da preocupação pelos refeitórios estudantis apresentam-se Pinho *et al.* (2014) com o estudo de seis refeitórios de escolas pré-primárias e do 1º e 2º ciclo do ensino básico e Ribeiro (2017) com avaliação da cantina da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Pinho *et al.* (2014) medem *in situ* o tempo de reverberação pela Norma NP EN ISO 3382-2:2011 e o ruído de fundo através da medição dos níveis de pressão sonora contínuos equivalentes, ponderados A, em períodos de 15 minutos, durante o horário de almoço. Ribeiro (2017) avalia ainda o parâmetro RASTI pela norma CEI 268-16.

Relativamente à comparação final dos valores obtidos com os valores limite definidos na legislação, o tempo de reverberação, na ausência de um artigo que contemple as cantinas universitárias é, em ambos os casos, analisado através do artigo 7º do RRAE.

Em relação à exposição ao ruído Pinho *et al.* (2014) apenas concluem que, na generalidade, os alunos, nos horários das refeições, estão expostos a níveis sonoros contínuos equivalentes superiores a 80 dB(A) devido, sobretudo, às atividades de todos os utentes. Já Ribeiro (2017) recorre aos valores propostos por Lebo *et al.* (1994) para espaços de restauração e acaba por afirmar que as anomalias acústicas detetadas se devem, principalmente, aos erros de conceção arquitetónica e à elevada densidade de utilizadores – Quadro 3.3. Neste mesmo trabalho, o parâmetro RASTI é analisado segundo a classificação sugerida no Quadro 3.4.

Quadro 3.3 - Classificação dos espaços de restauração relativamente à exposição ao ruído
(adaptado de Lebo *et al.*, 1994)

| | | |
|-----------------|------------------------|--|
| Classe 1 | $L < 65$ dB(A) | Atmosfera tranquila com serenidade acústica. |
| Classe 2 | $65 \leq L < 75$ dB(A) | Alta variabilidade na inteligibilidade de fala para indivíduos normais e com deficiência auditiva. |
| Classe 3 | ≥ 75 dB(A) | Alto nível de ruído ambiente; conversa difícil para os clientes com audição normal e impossível para pessoas com perdas auditivas. |

Quadro 3.4 - Relação entre o RASTI e a inteligibilidade e privacidade da palavra
(adaptado de Ribeiro, 2017 *apud* Nahid M. e Hodgson M., 2010)

| RASTI | Privacidade | Inteligibilidade |
|-------------------|--------------------|-------------------------|
| < 0.30 | Excelente | Muito Fraca |
| $[0.30 ; 0.45 [$ | Boa | Fraca |
| $[0.45 ; 0.60 [$ | Suficiente | Suficiente |
| $[0.60 ; 0.75 [$ | Fraca | Boa |
| ≥ 0.75 | Muito Fraca | Excelente |

Restaurantes: A preocupação com o ambiente sonoro dos espaços de restauração não se restringe apenas a Portugal. A título de exemplo, com o foco particularmente em restaurantes, apresenta-se Bravo *et al.* (2010) com o estudo do tempo de reverberação de vinte e um restaurantes na cidade de Valladolid, Espanha.

As exigências legais espanholas expostas em Documento Básico HR (2009) – Quadro 3.5 - levam Bravo *et al.* (2010) a avaliar se os espaços de restauração da cidade cumprem os valores referentes ao tempo de reverberação. A seleção dos restaurantes é aleatória, excluindo apenas os de dimensões reduzidas e de comida rápida. A análise é feita *in situ* com recurso ao sistema “Symphonie” e ao software “dBBATI2” com o intuito de obter o valor T20 de forma digital e

gráfica. No final, conclui-se que apenas quatro dos restaurantes ultrapassam o valor permitido de 0.9 segundos.

Quadro 3.5 - TR exigido pela lei espanhola (adaptado de Documento Básico HR, 2009)

| | TR |
|---|----------------------|
| Salas de Aula e de Conferências Vazias (Sem Ocupação e Sem Mobiliário) $V < 350 \text{ m}^3$ | $\leq 0.7 \text{ s}$ |
| Salas de Aula e de Conferências Vazias (Incluindo as Cadeiras Fixas) $V < 350 \text{ m}^3$ | $\leq 0.5 \text{ s}$ |
| Restaurantes e Refeitórios Vazios | $\leq 0.9 \text{ s}$ |

3.3.2 Centros Comerciais

Tal como as estações ferroviárias, os centros comerciais são espaços frequentados por muitas pessoas e onde se registam inúmeras atividades. Assemelham-se ainda, frequentemente, pela sua dimensão, pelo seu pé direito elevado e pelos seus amplos espaços de circulação. São locais potencialmente ruidosos e, tal como indica Pereira (2015) associam-se às seguintes problemáticas acústicas: espaços reverberantes, elevado ruído de fundo, reduzida inteligibilidade da palavra e sensação de desconforto acústico.

Carvalho e Pereira (2015) apresentam um projeto de caracterização acústica interior de quatro centros comerciais, no Porto. Esta caracterização passa pela medição *in situ* do TR e do RF, num piso de referência e na zona de restauração, e pela posterior comparação com os valores ideais propostos – Quadro 3.6.

Quadro 3.6 - Valores ideais propostos para os espaços em análise
(adaptado de Carvalho e Pereira, 2015)

| | Valores Ideais |
|---|--------------------------|
| Tempo de Reverberação – $TR_{500 \text{ Hz}, 1 \text{ kHz}, 2 \text{ kHz}}$ | 1.0 a 1.2 s |
| Ruído de Fundo - L_{Aeq} | $\leq 55 \text{ dB (A)}$ |

A análise do TR é realizada em regime de não ocupação com recurso a uma fonte sonora e a um sonómetro. Ainda assim, existem sempre fontes permanentes impossíveis de silenciar no decorrer dos ensaios. Os melhores resultados são obtidos num dos centros comerciais onde o piso de referência e a praça de alimentação têm características favoráveis à acústica: corredor longo e envolvente absorvente. O pior centro comercial é o que apresenta valores excessivos

de TR no intervalo dos 500 Hz aos 2 kHz, na medida em que este é o domínio onde se espera uma adequada inteligibilidade da palavra. Os altos valores de TR devem-se ao pé direito elevado que influencia, por sua vez, o volume do espaço. Também o número de andares do edifício, a configuração em galeria e as superfícies pouco absorventes, como as cerâmicas e o vidro, más absorventes em frequências médias e altas, afetam negativamente o valor de TR (Carvalho e Pereira, 2015).

As medições do ruído de fundo, contrariamente às do tempo de reverberação, são feitas em dois regimes: para o piso de referência apenas sem ocupação e para a praça de alimentação com e sem utentes. Os valores são fornecidos em valores médios globais, ou seja, nível sonoro de ruído de fundo L_{Aeq} , e em espectro sonoro para as bandas de 1/1 oitava dos 16 Hz aos 16 kHz. No final, conclui-se que, em regime de ocupação, as zonas de restauração de todos os centros comerciais ultrapassam o valor ideal de 55 dB(A), devido ao elevado número de utentes (Carvalho e Pereira, 2015).

3.3.3 Longos Corredores

A classificação dos vários tipos de espaços, como comunitários ou de circulação implica a inclusão dos corredores nesta tipologia. Servir, frequentemente, de passagem diária a um número elevado de utilizadores e possuir dimensões consideráveis tornam os corredores muito reverberantes e, conseqüentemente, um grande desafio acústico.

Braga (2014) analisa um corredor principal da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, com atributos muito interessantes do ponto de vista acústico: longo comprimento (184 m), elevado pé direito (5.24 m), existência de muitas superfícies refletoras e vários compartimentos adjacentes.

São calculados os parâmetros objetivos RASTI, TR, $L_{Ar,nT}$ e L_{Aeq} com utilizadores e, posteriormente, comparados com os valores impostos pelo RRAE. Ainda tendo em consideração este documento legal são obtidos os parâmetros relativos ao isolamento a ruídos aéreos da fachada e à absorção sonora média.

Dadas as características do espaço, mencionadas acima, o campo sonoro revela-se muito reverberante, o que leva também a uma absorção sonora equivalente inferior ao exigido. Conseqüentemente, o ruído de fundo tende a elevar-se e o RASTI a diminuir. Relativamente ao TR, como seria de esperar, também o seu valor fica acima do permitido.

O isolamento a ruídos aéreos da fachada contém resultados satisfatórios, mas o ruído padronizado proveniente de equipamentos não alcança o estabelecido pelo RRAE, devido ao som proveniente dos secadores das mãos, nas áreas adjacentes ao corredor (Braga, 2014).

3.3.4 Estações Ferroviárias

As estações ferroviárias, considerando a classificação de espaços comunitários e de circulação, caracterizam-se pela sua imensa heterogeneidade e complexidade. Uma grande diversidade construtiva, a par com um elevado número de fontes de ruído, traduz-se em realidades e abordagens acústicas também muito diferentes. Porém, o facto de se ter encarado, durante muito tempo, este tipo de locais como zonas de circulação e menos como zonas comunitárias, levou à despreocupação com o seu ambiente acústico. Desta forma, o número de estudos nesta área, aplicados a estações, tanto a nível nacional como internacional, é muito reduzido.

Ainda assim, Li *et al.* (2016) analisam a Estação Ferroviária Subterrânea de Futian, na China. Apresentada como uma das maiores estações da Ásia, e em funcionamento desde novembro de 2015, Futian apresenta problemas acústicos devido à volumetria de determinadas áreas e ao facto de uma gare subterrânea ter mais dificuldade em dissipar a energia sonora do que uma outra ao nível do solo. Encarando estas possíveis insuficiências acústicas como uma ameaça à segurança dos utentes, Li *et al.* (2016) optam pelas medições acústicas do TR e do RASTI de determinadas zonas; um ambiente acústico adequado revela-se muito importante, porque, face à eventual necessidade de evacuação da estação, a inteligibilidade deve estar assegurada.

O estudo inicia-se com ensaios acústicos a duas outras estações, para conhecer os seus pontos fracos e os seus pontos fortes com o objetivo final de caracterizar a Estação de Futian, através de simulação computacional. As estações são escolhidas pelas suas semelhanças em termos de dimensões e de afluência.

A Estação Central de Berlim, na Alemanha, é a primeira a ser objeto de estudo. Em funcionamento desde 2006 e com uma zona subterrânea, é uma das gares europeias mais utilizadas. Os ensaios ao ruído são realizados nas várias zonas do edifício, obtendo-se resultados muito satisfatórios, devido aos tratamentos acústicos implementados. A existência de painéis perfurados e esponjas de melanina a circundar as luzes tornam o seu teto bastante absorvente. Do mesmo modo, as paredes revestidas de placa de cerâmica perfurada e as ferrovias igualmente incorporadas de painéis absorventes contribuem para uma maior área de absorção (Li *et al.*, 2016).

Os segundos ensaios acústicos são realizados na Estação Ferroviária de Beijing, na China. Esta data de 1959 e continua a ser das estações mais utilizadas. Na análise dos resultados é necessário ter em conta que esta não é uma estação europeia e que, por isso, o número de utilizadores é francamente maior. Como os ensaios são feitos à tarde, período de maior movimento, é impossível obter valores credíveis de TR. Ainda assim, pelas medições do ruído ambiente conclui-se que a principal fonte de ruído existente é a voz humana com níveis sonoros de 70 dB(A), registados nas frequências de 200 Hz aos 2000 Hz, para uma conversa normal (Li *et al.*, 2016).

Em última instância é feita a simulação computacional da Estação de Futian, partindo dos dados de Beijing, em que a voz humana é a principal fonte de ruído. De notar que as pessoas vão elevando o seu tom de voz se o ruído ambiente também subir, detetando-se quatro patamares de ruído (o primeiro com níveis inferiores a 50 dB(A) e o último detendo superiores 80 dB(A)) a que se associa o Efeito *Cocktail Party*. Com o objetivo de reduzir os níveis registados nos patamares mais críticos, através da redução da reflexão do som, da redução do TR e da melhoria do ambiente sonoro, recorre-se ao programa computacional “*RAYNOISE*”. Esta tecnologia permite criar soluções acústicas, com diferentes áreas de absorção, a aplicar no teto e nas paredes (Li *et al.*, 2016).

No final, ainda que a solução com melhores resultados seja a que contém cem por cento de área absorvente, esta não revelaria um ambiente harmonioso, pelo que não é viável. Opta-se por uma outra alternativa, que utiliza painel de alumínio para as paredes, cobrindo as antigas com *spray* absorvente. No teto opta-se por barras de alumínio em U perfuradas em teto suspenso, criando um ambiente com um coeficiente de absorção de 0.65. No simulador, registam-se valores de TR entre os 1,9 segundos e os 2,1 segundos para 500 Hz. Com esta solução obtém-se ainda um RASTI com resultados entre os 0,4 e os 0,45 o que já permite um ambiente acústico satisfatório, segundo a classificação utilizada – Quadro 3.7 (Li *et al.*, 2016).

Quadro 3.7 - Valores ideais para o RASTI (adaptado de Li *et al.*, 2016)

| RASTI | |
|---------------|-----------------------------------|
| < 0.2 | Discurso Impercetível |
| [0.2 , 0.4] | Discurso Razoavelmente Percetível |
| [0.4 , 0.6] | Discurso Percetível |
| > 0.6 | Discurso Muito Percetível |

4 CARACTERIZAÇÃO ACÚSTICA DE DUAS ESTAÇÕES FERROVIÁRIAS – ESTUDOS DE CASO

4.1 O Transporte Ferroviário em Portugal

Ainda que o conceito de circulação ferroviária tenha surgido no início do século XVIII, através da Revolução Industrial, Portugal apenas inaugurou o seu primeiro troço ferroviário, com 36 quilómetros de extensão, a 28 de outubro de 1856, estabelecendo a ligação entre Lisboa e o Carregado. Nesse mesmo ano, surgiu a primeira estação ferroviária em Lisboa-Santa Apolónia que seria o ponto de partida para a construção de uma rede ferroviária nacional e de centenas de estações ao longo do país (infraestruturasdeportugal@, 2018).

Ao longo dos anos, a responsabilidade pelo setor ferroviário nacional foi sofrendo alterações. A exploração dos serviços iniciou-se a 11 de maio de 1860, com a criação da Companhia Real de Caminhos de Ferro Portugueses por José de Salamanca y Mayol, mas em 1974, por força de sucessivas mudanças, foi adotado o nome Comboios de Portugal, E.P.. Porém, a publicação do Decreto-lei nº 137-A/2009, de 12 de junho, retirou a gestão das infraestruturas à Comboios de Portugal, E.P., pelo que a sua designação foi alterada para Comboios de Portugal E.P.E.. A administração das infraestruturas ficou a cargo da Infraestruturas de Portugal, SA, empresa pública criada em junho de 2015, resultante da fusão entre as Estradas de Portugal, EP e a REFER, Rede Ferroviária Nacional (infraestruturasdeportugal@, 2018).

A justificação para a maior parte destes espaços não ter condições acústicas adequadas advém do facto de muitas das estações ferroviárias terem sido projetadas e construídas nos séculos XIX e XX, período em que as disposições regulamentares na área da acústica não estavam ainda adequadamente implementadas e de não haver sensibilidade dos utentes para com este tema.

4.2 Caracterização da Rede Ferroviária Portuguesa - Linha do Norte

Existem 51 linhas, ramais e concordâncias com tráfego ferroviário em Portugal (Infraestruturas de Portugal, 2017b). Algumas destas ferrovias, considerando o subcapítulo 3.2, sobre o elevado número de passagens diárias que registam, classificam-se como “grandes infraestruturas ferroviárias”. Uma delas é a Linha do Norte, construída de 1853 a 1877, que liga Porto-Campanhã a Lisboa-Santa Polónia e que se articula com outras linhas secundárias – Figura 4.1. Com 336 quilómetros de extensão em via dupla (90%) ou múltipla (10%) e integralmente

eletrificada, a Linha do Norte regista mais de 600 comboios de passageiros e cerca de 120 de mercadorias por dia. No total, esta infraestrutura compreende 28 estações e 47 apeadeiros (Agência Portuguesa do Ambiente, 2017; Infraestruturas de Portugal, 2017a).



Figura 4.1 - Linha do Norte (Infraestruturas de Portugal, 2017a)

4.3 Caracterização da Rede de Estações Ferroviárias Portuguesa

As linhas existentes assistem 928 estações que, por sua vez, apresentam 474 com serviços de passageiros e/ou mercadorias. As estações subdividem-se em quatro tipologias com base no seu nível de intermodalidade, no serviço ferroviário disponibilizado, nos serviços prestados ao utilizador e no tráfego de passageiros. Para paragens ferroviárias de categoria inferior às das estações em que, na maioria das vezes, não existe edifício nem serviços, é usual a denominação de apeadeiro (DRE, 2006; IP Património, 2014).

4.4 Medições Acústicas Objetivas

Neste trabalho, foram avaliadas, na vertente acústica, duas estações ferroviárias portuguesas: Coimbra-B (estudo de caso I) e Aveiro (estudo de caso II). Ambas as medições foram efetuadas de acordo com a Norma ISO 3382-1 e com recurso a dois tipos de ensaios: primeiramente, recorrendo à injeção de sinal no sistema eletroacústico da estação e, numa segunda fase, emitindo o ruído de teste através de uma “fonte sonora normalizada”. Os parâmetros de qualidade sonora escolhidos para analisar foram o T20, o EDT, o D₅₀, o RASTI e o STI.

A par com as avaliações anteriores, foram ainda efetuadas medições do ruído ambiente nas estações. Este registo, em paralelo com o dos restantes parâmetros, é importante, uma vez que, tendencialmente, quanto maior for o decréscimo do ruído melhor serão os valores dos parâmetros de qualidade sonora. Todavia, no estudo de caso II, a amostragem revelou-se curta e pouco representativa pelo que foram apenas cruzados alguns resultados.

Para obter resultados credíveis, não perturbando o normal funcionamento das estações, optou-se por realizar os ensaios em período noturno. Ainda assim, medir o ruído ambiente numa manhã mais agitada revelou-se pertinente no estudo de caso I. Desta forma, as medições acústicas na estação de Coimbra-B foram repartidas em dois dias: durante o período noturno, do dia 2 de maio de 2018, e na manhã do dia 3 de maio de 2018. Na estação de Aveiro, realizaram-se durante o período noturno, do dia 7 de maio de 2018.

4.5 Equipamento Utilizado

Para a realização dos ensaios acústicos utilizaram-se os seguintes equipamentos:

- Analisador portátil, de dois canais, modelo Symphonie, da marca 01 dB, ligado a um computador portátil;
- Microfone, modelo 40AF, e pré-amplificador, modelo 26AK, da marca GRAS;
- Calibrador de microfone, modelo CAL, da marca 01 dB;
- Sonómetro Integrador, modelo Solo Master, da marca 01dB, com microfone, modelo MCE212, e pré-amplificador, modelo PRE21S, da marca 01dB;
- Calibrador de microfone, modelo NC74, da marca Rion;
- Fonte hemidodecaédrica de sons aéreos, modelo L-MS01, da marca Morset Sound Development;
- Gerador de ruído, modelo RG-10, da marca 01 dB;
- *Software* específico (dBBati 32, dBTrig e dBtraint) da marca 01 dB.

4.6 Estação Ferroviária de Coimbra-B – Estudo de Caso I

A Estação Ferroviária de Coimbra-B, popularmente chamada de “estação velha”, faz parte da Linha do Norte e localiza-se a 217,3 quilómetros da estação de Lisboa-Santa Apolónia. Foi construída pela Companhia Real dos Caminhos de Ferro, registou a primeira passagem de um comboio a 10 de abril de 1864 e, ao longo dos anos, foi alvo de várias reabilitações (Alves, 2015; E.P.E., 2018a).

4.6.1 Caracterização da Estação e da sua Zona Envolvente

A proximidade de Coimbra-B a vários centros urbanos, como o Loreto, o Bairro do Loreto, o Ingote e o Monte Formoso, a existência de diversas vias rodoviárias como a Estrada Nacional 111 (Estrada do Baixo Mondego) e a Rua Manuel de Almeida e Sousa e a grande afluência de utilizadores à própria estação, tornam a sua zona envolvente bastante movimentada – Figura 4.2.

Relativamente à infraestrutura da estação, esta é constituída pelas linhas ferroviárias, pelas plataformas e por vários edifícios independentes. O utilizador comum tem acesso ao bar, às casas de banho, à sala de espera e bilheteira e às plataformas onde existe uma segunda zona de espera fechada.



Figura 4.2 - Mapa da zona envolvente à Estação de Coimbra-B (Google Maps, 2018)

4.6.2 Pontos de Medição

O primeiro espaço objeto de estudo foi a plataforma central da estação. Uma zona aberta e coberta, onde muitos utilizadores optam por esperar, e onde se verificam constantes entradas e saídas dos comboios. Neste local, apenas se mediram os parâmetros acústicos com emissão pelo sistema eletroacústico, em período noturno. Durante os ensaios, o sonómetro foi colocado na plataforma para medição do ruído ambiente.

A segunda área estudada foi a sala de espera e bilheteira, igualmente em período noturno – Quadro 4.1 e Fotografia 4.1. Neste espaço, recorreu-se à fonte sonora normalizada para emissão do ruído de teste e ao sonómetro para medição do ruído ambiente – Figura 4.3. Em período diurno, apenas foi avaliado o ruído ambiente com o sonómetro situado na plataforma central e no interior da sala de espera e bilheteira.

Quadro 4.1 - Dimensões da sala de espera e bilheteira da Estação Ferroviária de Coimbra-B

| | |
|------------|--------------------|
| Área Útil | 107 m ² |
| Pé Direito | 4 m |
| Volume | 428 m ³ |



Fotografia 4.1 - Posicionamento do microfone e da fonte DO6 na sala de espera e bilheteira

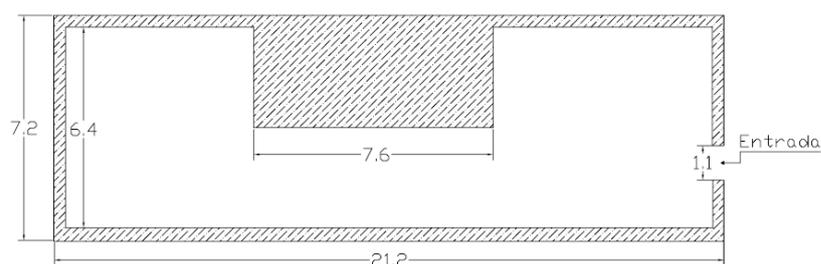


Figura 4.3 - Planta esquemática da sala de espera e bilheteira (dimensões em metros)

4.6.3 Resultados do Ruído Ambiente

Na noite de 2 de maio de 2018, realizaram-se as medições dos parâmetros acústicos na plataforma central e na sala de espera e bilheteira, tendo sido adotado como complemento um sonómetro a medir o ruído ambiente no decorrer de todo o procedimento – Quadro 4.2 e Quadro 4.3. Em ambos os casos é possível observar valores relativamente altos, que se assemelham aos reportados por Li *et al.* (2016), e que não cumprem os 55 dB(A) propostos por Carvalho e Pereira (2015) para que se verifique um bom ambiente.

Quadro 4.2 - Registos de ruído efetuados na plataforma exterior

| | Plataforma Exterior Horário da Medição: 23h55m |
|---|---|
| Ruído de Ocupação (Sistema Eletroacústico) | $L_{Aeq} = 76$ dB(A) |
| Ruído Ambiente | $L_{Aeq} = 60$ dB(A) |
| | $\Delta L = 16$ dB(A) |

Quadro 4.3 - Registos de ruído efetuados na sala de espera e bilheteira

| | Sala de Espera e Bilheteira Horário da Medição: 00h29m |
|--------------------------------------|---|
| Ruído de Ocupação (Fonte DO6) | $L_{Aeq} = 80$ dB(A) |
| Ruído Ambiente | $L_{Aeq} = 51$ dB(A) |
| | $\Delta L = 29$ dB(A) |

Durante o período diurno, do dia 3 de maio de 2018, efetuaram-se novas medições do ruído ambiente, o que possibilitou captar o ruído percecionado numa manhã comum em Coimbra-B.

As medições ocorreram, num primeiro momento, na plataforma central, desde as 11h44m até às 13h00m. Nesta área, encontravam-se vários utentes da estação e foram registados 10 eventos relacionados com a passagem de comboios – Quadro 4.4. A título de exemplo, apresentam-se a Figura 4.4 e Figura 4.5 com a evolução dos dois eventos com maior L_{Aeq} ao longo das bandas de frequência e a Figura 4.6 com os restantes eventos. No final de todo o período de medição, foi obtido um valor de $L_{Aeq} \approx 70$ dB(A).

As segundas medições efetuaram-se no interior da sala de espera e bilheteira, no período das 13h10m às 13h40m, quando o número de pessoas era elevado e se percecionava a circulação de comboios no exterior. Através das leituras registadas pelo sonómetro obteve-se um $L_{Aeq} \approx 64$ dB(A).

Quadro 4.4 - Eventos percecionados na plataforma relacionados com a passagem de comboios e respetivo L_{Aeq} (dB(A))

| | |
|---|----------------------|
| Evento 1 - IC; Braga-Lisboa; Paragem | $L_{Aeq} = 75$ dB(A) |
| Evento 2 - NR; Coimbra-Aveiro; Paragem | $L_{Aeq} = 77$ dB(A) |
| Evento 3 - Contentores; Fuentes Onoro - Entroncamento; Sem Paragem | $L_{Aeq} = 77$ dB(A) |
| Evento 4 - NR; Aveiro - Coimbra; Paragem | $L_{Aeq} = 70$ dB(A) |
| Evento 5 - Contentores; Alfarelos - Vilar Formoso; Sem Paragem | $L_{Aeq} = 86$ dB(A) |
| Evento 6 - NR; Coimbra - Guarda; Paragem | $L_{Aeq} = 77$ dB(A) |
| Evento 7 - NR; Entroncamento - Coimbra; Paragem | $L_{Aeq} = 62$ dB(A) |
| Evento 8 - NAQ; Porto - Lisboa; Paragem | $L_{Aeq} = 73$ dB(A) |
| Evento 9 - NR; Coimbra - Aveiro; Paragem | $L_{Aeq} = 76$ dB(A) |
| Evento 10 - NR; Guarda - Coimbra; Paragem | $L_{Aeq} = 73$ dB(A) |

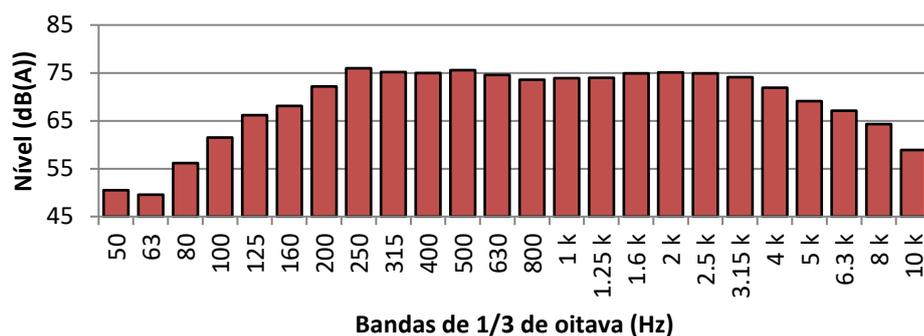


Figura 4.4 - Nível de pressão sonora do evento 5 por bandas de 1/3 de oitava

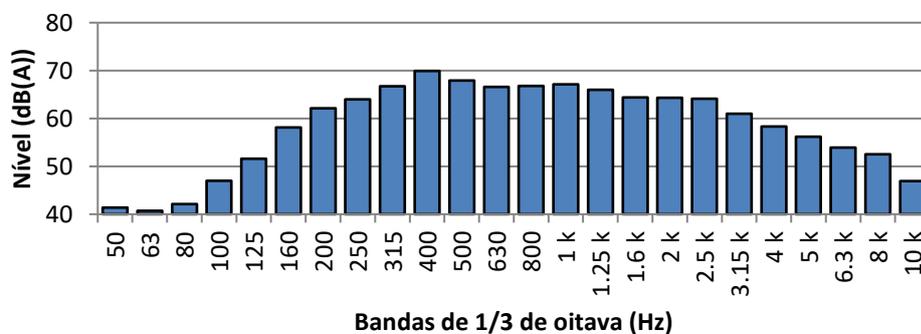


Figura 4.5 - Nível de pressão sonora do evento 6 por bandas de 1/3 de oitava

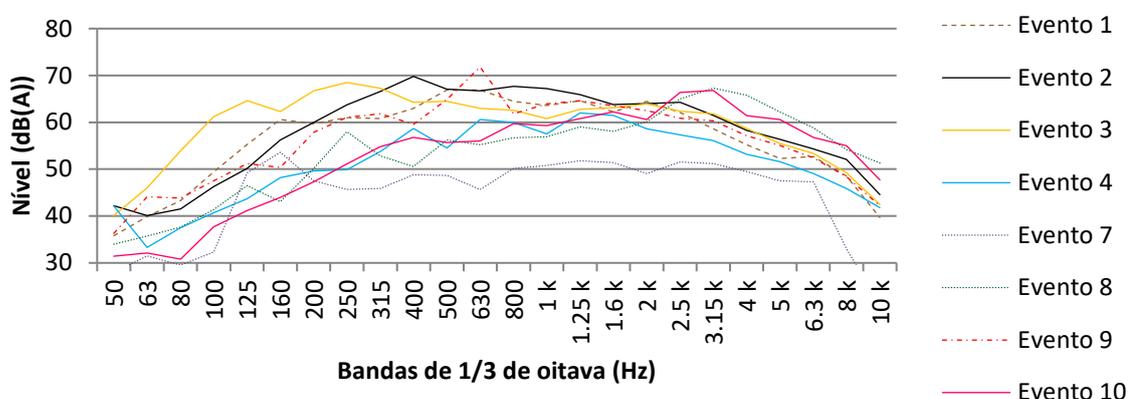


Figura 4.6 - Nível de pressão sonora dos restantes eventos por bandas de 1/3 de oitava

4.6.4 Resultados do Parâmetro Tempo de Reverberação (T20)

Como na plataforma se fizeram medições com emissão de ruído de teste através do sistema eletroacústico da estação, os valores de TR obtidos não são cientificamente corretos. Ainda assim, partindo do princípio de que esta é uma zona exterior, é expectável uma reverberação reduzida. Já na sala de espera fechada, utilizando a fonte sonora normalizada DO6, todos os casos apresentaram resultados e tornou-se possível retirar conclusões – Quadro 4.5 e Figura 4.7.

Quadro 4.5 - Valores de T20 obtidos na sala de espera e bilheteira

| Bandas de Oitava (Hz) | Sala de Espera e Bilheteira | |
|--------------------------|-----------------------------|--|
| | T20 (s) | |
| 125 | 1.7 | |
| 250 | 1.8 | |
| 500 | 2.3 | |
| 1k | 2.4 | |
| 2k | 2.1 | |
| 4k | 1.8 | |

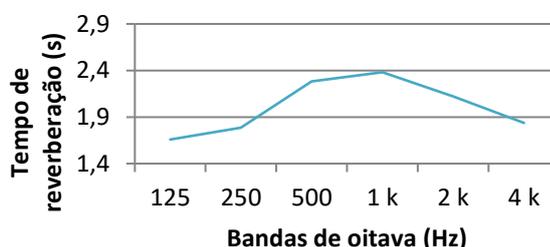


Figura 4.7 - T20 obtido para as várias bandas de oitava na sala de espera e bilheteira

O valor requerido de TR calculou-se segundo a atual legislação portuguesa com a devida contabilização da existência de difusores públicos de mensagens. Concluiu-se que a sala de espera da estação apresenta um tempo de reverberação excessivo (1.7 s) e próximo do dobro relativamente ao permitido (0.9 s) – Quadro 4.6.

Quadro 4.6 - Comparação do valor de TR obtido e o exigido na legislação portuguesa

| | Sala de Espera e Bilheteira |
|---|-----------------------------|
| TR_{médio} (500, 1k, 2k (Hz)) (s) | 2.3 |
| TR_{médio} (500, 1k, 2k (Hz)) com Incorporação de Incerteza (-25%) (s) | 1.7 |
| TR_{máximo} – Portugal (s) | 0.9 |

4.6.5 Resultados do Parâmetro *Early Decay Time* (EDT)

Tal como o T20 o parâmetro EDT apenas apresentou resultados credíveis no espaço caracterizado com a fonte sonora omnidirecional DO6 – Quadro 4.7 e Figura 4.8.

Quadro 4.7 - EDT obtido na sala de espera e bilheteira

| Bandas de Oitava (Hz) | Sala de Espera e Bilheteira |
|--|-----------------------------|
| | EDT (s) |
| 125 | 1.5 |
| 250 | 1.7 |
| 500 | 2.0 |
| 1k | 2.1 |
| 2k | 2.0 |
| 4k | 1.6 |
| EDT_{médio} (500Hz, 1kHz, 2kHz) | 2.0 |

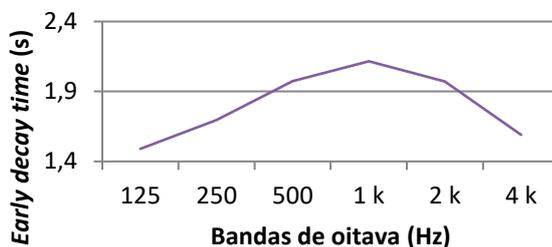


Figura 4.8 - EDT obtido para as várias bandas de oitava na sala de espera e bilheteira

4.6.6 Resultados do Parâmetro Definição da Palavra (D_{50})

O parâmetro D_{50} foi obtido para os dois espaços. Após o cálculo de D_{50} (500Hz,2kHz), foi possível concluir que a definição da palavra apresenta bons resultados na plataforma central, excetuando os momentos em que ocorre a passagem de comboios (valor reduzido para 49 %) – Quadro 4.8. Em contrapartida, na sala interior, declaram-se resultados francamente baixos – Quadro 4.9.

Quadro 4.8 - Valores de D_{50} obtidos na plataforma exterior

| Bandas de Oitava (Hz) | Plataforma Exterior | |
|-----------------------|---|---------------------------|
| | Emissão pelo Sistema Eletroacústico com $\Delta L = 16$ dB(A) | |
| | D_{50} (%) | D_{50} (500Hz,2kHz) (%) |
| 125 | 61 | 78 |
| 250 | 70 | |
| 500 | 80 | |
| 1k | 84 | |
| 2k | 76 | |
| 4k | 78 | |

Quadro 4.9 - Valores de D_{50} obtidos na sala de espera e bilheteira

| Bandas de Oitava (Hz) | Sala de Espera e Bilheteira Emissão pela Fonte Sonora Omnidirecional DO6 com $\Delta L = 29$ dB(A) | |
|-----------------------|--|---------------------------|
| | D_{50} (%) | D_{50} (500Hz,2kHz) (%) |
| 125 | 48 | 35 |
| 250 | 40 | |
| 500 | 33 | |
| 1k | 33 | |
| 2k | 37 | |
| 4k | 45 | |

4.6.7 Resultados dos Parâmetros *Rapid Speech Transmission Index (RASTI)* e *Speech Transmission Index (STI)*

Os resultados obtidos para os parâmetros RASTI e STI revelaram-se razoáveis para os dois espaços analisados, ainda que, na plataforma exterior tenham sido mais relevantes e apenas com descida para 61 % e 63 % aquando da passagem de um comboio – Quadro 4.10 e Quadro 4.11. Constatando-se uma adequada inteligibilidade em ambas as zonas, foi possível verificar o exposto em teoria: para valores de RASTI maiores que 70 %, D_{50} é maior que o primeiro (caso da plataforma). Já para resultados do RASTI menores que 60 %, D_{50} regista-se menor que o primeiro (caso da sala de espera e bilheteira).

Foi ainda possível caracterizar os dois pontos de medição subjetivamente. Tendo em conta o Quadro 3.7, apurou-se que a plataforma exterior possibilitava um discurso muito perceptível e a sala de espera apenas perceptível. Já pelo Quadro 3.4, apesar de a inteligibilidade ser melhor na plataforma, a sua privacidade estava comprometida, contrariamente ao que acontecia na sala de espera.

Quadro 4.10 - Valores de RASTI e STI obtidos na plataforma exterior

| | Plataforma Exterior |
|-----------|---------------------|
| RASTI (%) | 77 |
| STI (%) | 76 |

Quadro 4.11 - Valores de RASTI e STI obtidos na sala de espera e bilheteira

| | Sala de Espera e Bilheteira |
|-----------|-----------------------------|
| RASTI (%) | 54 |
| STI (%) | 54 |

4.7 Estação Ferroviária de Aveiro - Estudo de Caso II

Inicialmente inaugurada a 10 de abril de 1864 pela Companhia Real dos Caminhos de Ferro, a Estação Ferroviária de Aveiro integra-se na Linha do Norte e localiza-se a 272,7 quilómetros da estação de Lisboa-Santa Apolónia. Depois da principal reabilitação em 1916, o novo edifício da estação só foi construído pela REFER, em 2005, como parte integrante da requalificação da Linha do Norte. Uma vez que a estação antiga já não é utilizada para serviços ferroviários, optou-se por realizar todos os ensaios acústicos no edifício mais recente (E.P.E., 2018b).

4.7.1 Caracterização da Estação e da sua Zona Envolvente

O edifício novo da Estação de Aveiro subdivide-se em dois pisos. Ao nível do solo concentram-se as linhas ferroviárias, as respetivas plataformas e algumas zonas de acesso. No piso subterrâneo, os utilizadores podem usufruir dos espaços de comércio, das casas de banho e da sala de espera. Grande parte da área é ainda ocupada por uma passagem subterrânea e por átrios de acesso com um elevador pé direito.

A estação encontra-se perto de vários centros urbanos como Esgueira, Glória e Forca, intersetando vias movimentadas como a Avenida Dr. Lourenço Peixinho e a Avenida Vasco Branco. Esta localização e o facto de ser a única gare ferroviária da cidade justificam a suscetibilidade ao movimento e à captação de diferentes tipos de ruído – Figura 4.9.

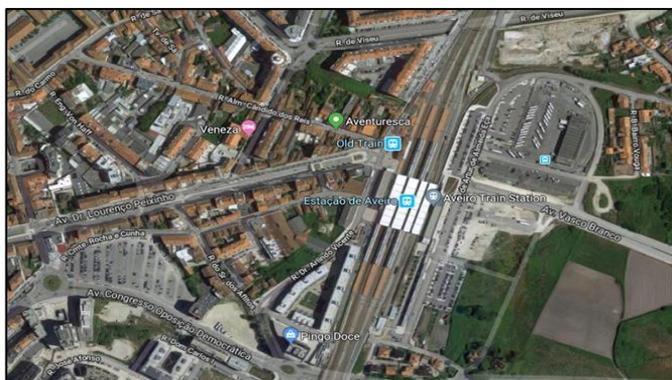


Figura 4.9 - Mapa da zona envolvente à Estação de Aveiro (Google Maps, 2018)

4.7.2 Pontos de Medição

Em primeiro lugar, com o objetivo de caracterizar uma zona fechada, realizaram-se os ensaios na sala de espera do piso subterrâneo e, ainda que estes se tenham feito em período noturno, é de ter em consideração que as duas entradas do espaço permaneceram abertas – Fotografia 4.2 e Figura 4.10.



Fotografia 4.2 - Posicionamento do equipamento na sala de espera

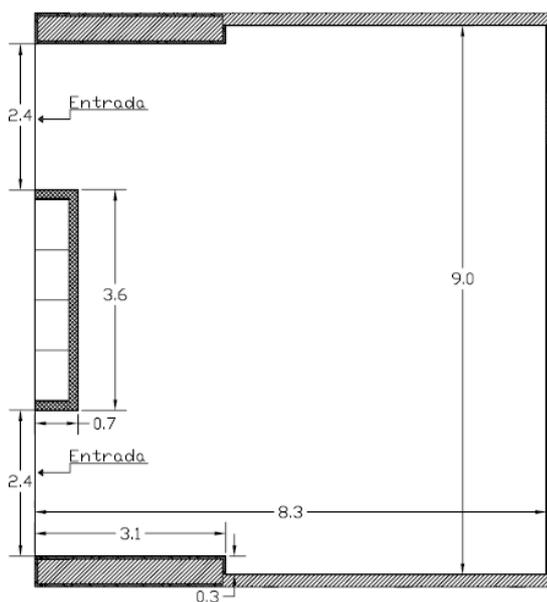


Figura 4.10 - Planta esquemática da sala de espera (dimensões em metros)

Dadas as características particulares da passagem subterrânea (extensão) – Fotografia 4.3 - e do átrio nascente (altura do pé direito) – Fotografia 4.4 - a que esta converge considerou-se interessante obter os valores dos seus parâmetros acústicos – Figura 4.11. Sendo estes espaços semiabertos, as suas áreas e respetivos volumes obtiveram-se por estimativa – Quadro 4.12.



Fotografia 4.3 - Posicionamento do equipamento na passagem subterrânea



Fotografia 4.4 - Posicionamento do equipamento no átrio nascente

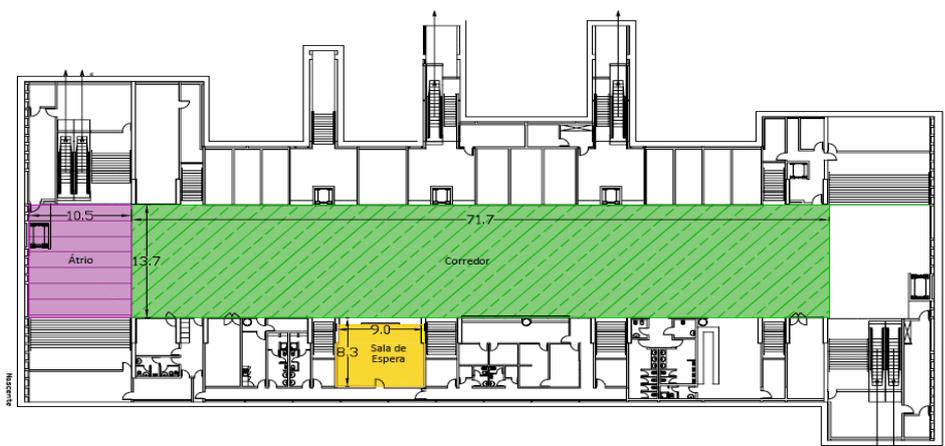


Figura 4.11 - Planta esquemática do piso subterrâneo (dimensões em metros)

Quadro 4.12 - Dimensões dos três espaços analisados na Estação Ferroviária de Aveiro

| | Sala de Espera | Passagem Subterrânea | Átrio Nascente |
|----------------------------------|-----------------------|-----------------------------|-----------------------|
| Área útil (m²) | 71 | 982 | 144 |
| Pé Direito (m) | 4 | 4 | 16 |
| Volume (m³) | 284 | 3928 | 2304 |

4.7.3 Resultados do Ruído Ambiente

Como suporte às medições dos parâmetros acústicos nos três espaços, foi colocado, simultaneamente, um sonómetro a avaliar o ruído ambiente. Em todos os casos foi obtida, primeiramente, a variação ocorrida na sala, aquando da utilização do sistema eletroacústico da estação, e, posteriormente, recorrendo à fonte omnidirecional DO6. Através do Quadro 4.13 e do Quadro 4.14 é possível perceber que, em todos os espaços, o ruído de fundo inicial ficou entre 58 dB(A) e 60 dB(A), mas que, após injeção de sinal, foi a sala de espera que obteve valores maiores.

Relativamente à comparação entre as variações de ruído obtidas nos dois tipos de ensaios, é de salientar que, ainda que a utilização da fonte normalizada tenha apresentado valores superiores, o sistema eletroacústico encontrava-se em “modo noturno”.

Quadro 4.13 - Registos de ruído efetuados na Estação de Aveiro com uso do sistema eletroacústico

| | Sala de Espera Horário da Medição: 22h50m | Passagem Subterrânea Horário da Medição: 22h54m | Átrio Nascente Horário da Medição: 23h00m |
|---|--|--|--|
| Ruído de Ocupação (Sistema Eletroacústico) | $L_{Aeq} = 77$ dB(A) | $L_{Aeq} = 76$ dB(A) | $L_{Aeq} = 76$ dB(A) |
| Ruído Ambiente | $L_{Aeq} = 60$ dB(A) | $L_{Aeq} = 60$ dB(A) | $L_{Aeq} = 59$ dB(A) |
| | $\Delta L = 17$ dB(A) | $\Delta L = 16$ dB(A) | $\Delta L = 17$ dB(A) |

Quadro 4.14 - Registos de ruído efetuados na Estação de Aveiro com uso da fonte DO6

| | Sala de Espera Horário da Medição: 23h23m | Passagem Subterrânea Horário da Medição: 23h29m | Átrio Nascente Horário da Medição: 23h38m |
|--|--|--|--|
| Ruído de Ocupação (Fonte D06) | $L_{Aeq} = 83$ dB(A) | $L_{Aeq} = 79$ dB(A) | $L_{Aeq} = 81$ dB(A) |
| Ruído Ambiente | $L_{Aeq} = 60$ dB(A) | $L_{Aeq} = 59$ dB(A) | $L_{Aeq} = 59$ dB(A) |
| | $\Delta L = 23$ dB(A) | $\Delta L = 20$ dB(A) | $\Delta L = 22$ dB(A) |

4.7.4 Resultados do Parâmetro Tempo de Reverberação (T20)

Ainda que o parâmetro TR tenha sido obtido para os dois tipos de medições, os seus resultados com o sistema eletroacústico da estação não são cientificamente corretos. O cálculo do tempo de reverberação é efetuado para uma única fonte sonora e com um decaimento, no caso do T20, de pelo menos 20 dB. Desta forma, os valores apresentados no Quadro 4.15 e na Figura 4.12 referem-se exclusivamente aos ensaios com a fonte DO6 e expõem que, pela legislação portuguesa, apenas a passagem subterrânea atinge o tempo de reverberação permitido – Quadro 4.16.

Quadro 4.15 - T20 obtido nos três espaços da Estação Ferroviária de Aveiro

| Bandas de Oitava (Hz) | Sala de Espera | Passagem Subterrânea | Átrio Nascente |
|-----------------------|----------------|----------------------|----------------|
| | T20 (s) | | |
| 125 | 2.1 | 2.2 | - |
| 250 | 1.6 | 2.1 | - |
| 500 | 1.8 | 2.3 | 4.7 |
| 1k | 1.9 | 2.9 | 3.9 |
| 2k | 1.8 | 2.3 | 3.8 |
| 4k | 1.5 | 1.9 | 2.8 |

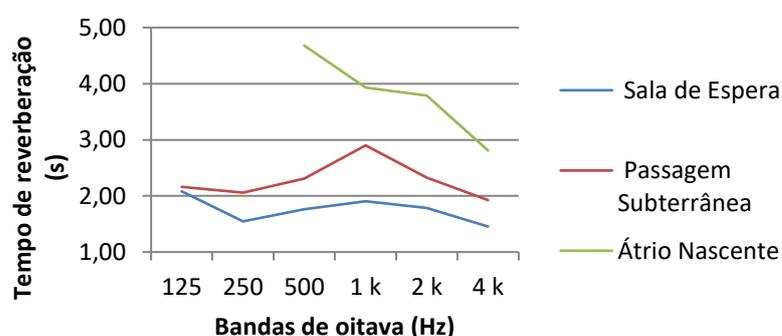


Figura 4.12 - Comparação dos resultados do T20 dos três espaços da Estação de Aveiro

Quadro 4.16 - Comparação dos valores de TR obtidos e o exigido na legislação portuguesa

| | Sala de Espera | Passagem Subterrânea | Átrio Nascente |
|---|----------------|----------------------|----------------|
| TR _{médio} (500, 1k, 2k (Hz)) (s) | 1.8 | 2.5 | 4.1 |
| TR _{médio} (500, 1k, 2k (Hz)) com Incorporação de Incerteza (-25%) (s) | 1.4 | 1.9 | 3.1 |
| TR _{máximo} – Portugal (s) | 0.8 | 1.9 | 1.6 |

4.7.5 Resultados do Parâmetro *Early Decay Time* (EDT)

Analogamente ao T20, o parâmetro EDT apenas apresentou resultados credíveis quando medido com a fonte omnidirecional DO6 – Quadro 4.17 e Figura 4.13.

Quadro 4.17 - EDT obtido nos três espaços da Estação Ferroviária de Aveiro

| Bandas de Oitava (Hz) | Sala de Espera | Passagem Subterrânea | Átrio Nascente |
|--|----------------|----------------------|----------------|
| | EDT (s) | | |
| 125 | 1.5 | 1.9 | - |
| 250 | 1.3 | 1.7 | - |
| 500 | 1.7 | 2.2 | 4.7 |
| 1k | 1.8 | 2.8 | 3.9 |
| 2k | 1.6 | 1.9 | 3.8 |
| 4k | 1.3 | 1.5 | 2.5 |
| EDT _{médio} (500Hz, 1kHz, 2kHz) | 1.7 | 2.3 | 4.1 |

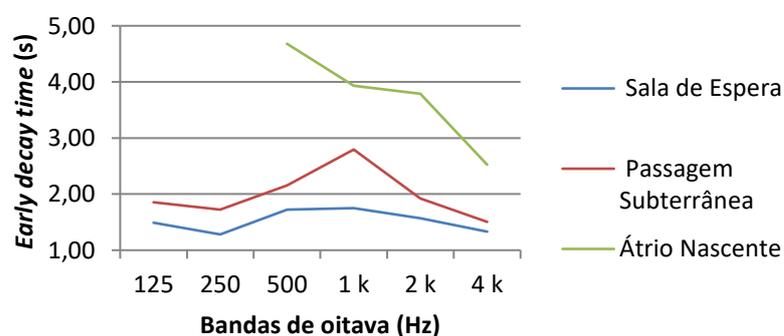


Figura 4.13 - Comparação dos resultados do EDT dos três espaços da Estação de Aveiro

4.7.6 Resultados do Parâmetro Definição da Palavra (D_{50})

Relativamente ao D_{50} , é possível concluir que nenhum dos espaços garantiu a definição da palavra utilizando o sistema eletroacústico, tendo sido obtidos resultados francamente baixos em todos eles. Já com emissão de sinal pela fonte sonora normalizada, existiu uma subida do parâmetro nos três pontos de medição, com alcance satisfatório na passagem subterrânea. Ainda assim, estes resultados devem ser analisados em paralelo com as variações do ruído ambiente: a utilização do sistema eletroacústico gerou decréscimos de ruído menores e induziu consequentemente a resultados de D_{50} também inferiores – Quadro 4.18, Quadro 4.19 e Quadro 4.20.

Quadro 4.18 - Valores de D_{50} obtidos na sala de espera

| Bandas de Oitava (Hz) | Sala de Espera | | | |
|--------------------------|-------------------------------------|---------------------------|-------------------------------|---------------------------|
| | Emissão pelo Sistema Eletroacústico | | Emissão pela Fonte Sonora DO6 | |
| | $\Delta L = 17 \text{ dB(A)}$ | | $\Delta L = 23 \text{ dB(A)}$ | |
| | D_{50} (%) | D_{50} (500Hz,2kHz) (%) | D_{50} (%) | D_{50} (500Hz,2kHz) (%) |
| 125 | 25 | 23 | 44 | 37 |
| 250 | 29 | | 57 | |
| 500 | 21 | | 37 | |
| 1k | 23 | | 36 | |
| 2k | 25 | | 37 | |
| 4k | 29 | | 43 | |

Quadro 4.19 - Valores de D_{50} obtidos na passagem subterrânea

| Bandas de Oitava (Hz) | Passagem Subterrânea | | | |
|--------------------------|-------------------------------------|---------------------------|-------------------------------|---------------------------|
| | Emissão pelo Sistema Eletroacústico | | Emissão pela Fonte Sonora DO6 | |
| | $\Delta L = 16 \text{ dB(A)}$ | | $\Delta L = 20 \text{ dB(A)}$ | |
| | D_{50} (%) | D_{50} (500Hz,2kHz) (%) | D_{50} (%) | D_{50} (500Hz,2kHz) (%) |
| 125 | 11 | 21 | 70 | 50 |
| 250 | 12 | | 63 | |
| 500 | 15 | | 48 | |
| 1k | 16 | | 44 | |
| 2k | 26 | | 53 | |
| 4k | 27 | | 57 | |

Quadro 4.20 - Valores de D_{50} obtidos no átrio nascente

| Bandas de Oitava (Hz) | Átrio Nascente | | | |
|--------------------------|-------------------------------------|---------------------------|-------------------------------|---------------------------|
| | Emissão pelo Sistema Eletroacústico | | Emissão pela Fonte Sonora DO6 | |
| | $\Delta L = 17 \text{ dB(A)}$ | | $\Delta L = 22 \text{ dB(A)}$ | |
| | D_{50} (%) | D_{50} (500Hz,2kHz) (%) | D_{50} (%) | D_{50} (500Hz,2kHz) (%) |
| 125 | 10 | 17 | 43 | 44 |
| 250 | 11 | | 60 | |
| 500 | 10 | | 54 | |
| 1k | 14 | | 43 | |
| 2k | 23 | | 34 | |
| 4k | 33 | | 60 | |

4.7.7 Resultados dos Parâmetros *Rapid Speech Transmission Index (RASTI)* e *Speech Transmission Index (STI)*

À semelhança do que se registou nas medições do parâmetro D_{50} , também no RASTI e no STI os resultados foram mais satisfatórios com a fonte DO6 e, tendo sido inferiores a 60 %, comprovou-se que, nestas situações, o D_{50} é menor que o RASTI – Quadro 4.21, Quadro 4.22 e Quadro 4.23.

Quadro 4.21 - Valores de RASTI e STI obtidos na sala de espera

| | Sala de Espera | |
|-----------|-------------------------------------|-------------------------------|
| | Emissão pelo Sistema Eletroacústico | Emissão pela Fonte Sonora DO6 |
| RASTI (%) | 47 | 55 |
| STI (%) | 47 | 56 |

Quadro 4.22 - Valores de RASTI e STI obtidos na passagem subterrânea

| | Passagem Subterrânea | |
|-----------|-------------------------------------|-------------------------------|
| | Emissão pelo Sistema Eletroacústico | Emissão pela Fonte Sonora DO6 |
| RASTI (%) | 43 | 59 |
| STI (%) | 44 | 63 |

Quadro 4.23 - Valores de RASTI e STI obtidos no átrio nascente

| | Átrio Nascente | |
|-----------|-------------------------------------|-------------------------------|
| | Emissão pelo Sistema Eletroacústico | Emissão pela Fonte Sonora DO6 |
| RASTI (%) | 41 | 56 |
| STI (%) | 40 | 60 |

Em termos subjetivos, pela análise do Quadro 3.7, a inteligibilidade dos três espaços é razoável nos dois tipos de medições, ainda que haja uma subida positiva com a adoção da fonte DO6. Contudo, pelo Quadro 3.4, é possível cruzar os dados do RASTI com o parâmetro subjetivo associado à privacidade, concluindo-se que a melhoria da inteligibilidade leva à perda da privacidade – Quadro 4.24.

Quadro 4.24 - Relação entre o RASTI, a Privacidade e a Inteligibilidade

| | Emissão pelo Sistema Electroacústico | | Emissão pela Fonte Sonora DO6 | |
|-----------------------------|--------------------------------------|------------------|-------------------------------|------------------|
| | Privacidade | Inteligibilidade | Privacidade | Inteligibilidade |
| Sala de Espera | Suficiente | Suficiente | Suficiente | Suficiente |
| Passagem Subterrânea | Boa | Fraca | Suficiente | Suficiente |
| Átrio Nascente | Boa | Fraca | Suficiente | Suficiente |

5 REABILITAÇÃO ACÚSTICA NOS ESTUDOS DE CASO – PROPOSTAS DE INTERVENÇÃO

5.1 Análise Global de Resultados e Identificação de Insuficiências Acústicas

5.1.1 Estação Ferroviária de Coimbra-B – Estudo de Caso I

A localização exterior da plataforma da estação de Coimbra-B fundamenta os seus valores de reverberação reduzidos. Sendo os parâmetros D_{50} , RASTI e STI influenciados por esta última característica, consequentemente, os seus resultados foram também muito positivos: 78 %, 77 % e 76 %, respetivamente. Todavia, concluiu-se que a passagem de comboios diminui estes valores para 49 %, 61 % e 63 %, o que pode ser justificado pela diminuição da relação sinal/ruído, nestes períodos.

Relativamente à sala de espera e bilheteira, foi possível concluir que o seu ambiente apresenta um fraco conforto acústico. Ainda que as dimensões deste espaço sejam razoáveis, existem outros fatores que contribuem para a sua grande reverberação: inexistência de superfícies absorventes e número considerável de envidraçados. Desta forma, o tempo de reverberação revelou-se excessivo, relativamente à atual legislação portuguesa (1.7 segundos), e o valor de D_{50} francamente baixo (35 %). Ainda assim, os valores do RASTI e do STI foram positivos (54 %).

No primeiro dia de medições, registou-se um ruído ambiente de 60 dB(A), na plataforma, e de 51 dB(A), na sala de espera. Porém, face ao diferente tipo de avaliações, o valor de ΔL para o segundo caso, em que se recorreu à fonte DO6, foi superior (29 dB(A)).

Já no segundo dia, concluiu-se que a circulação ferroviária e o grande número de utilizadores influenciam o ruído de fundo. Durante as medições com o sonómetro, na plataforma, registou-se a passagem de 10 comboios, conduzindo a um $L_{Aeq} \approx 70$ dB(A). Na sala de espera e bilheteira assinalou-se um valor para o L_{Aeq} de 64 dB(A).

5.1.2 Estação Ferroviária de Aveiro - Estudo de Caso II

Contrariamente ao que aconteceu no estudo de caso I, os três espaços da estação ferroviária de Aveiro foram objeto de ensaios tanto com o sistema eletroacústico da estação como com a fonte

sonora omnidirecional DO6, permitindo uma comparação entre os dois resultados dos parâmetros D_{50} , RASTI e STI.

Relativamente ao tempo de reverberação, o único espaço que cumpre o valor previsto na legislação portuguesa é a passagem subterrânea (1.9 segundos). A baixa absorção existente, nos outros dois pontos de medição, e o elevado volume, no caso do átrio nascente, poderão justificar a sua excessiva reverberação.

Em todos os espaços, os parâmetros D_{50} , RASTI e STI, quando determinados com o sistema eletroacústico, apresentaram resultados piores do que com a utilização da fonte DO6. Esta situação pode ser justificada através de três argumentos:

- Tendencialmente, quanto maior a ΔL melhor são os valores dos parâmetros acústicos, o que se comprova nos três pontos de medição;
- A diminuição da distância à fonte tem uma influência positiva nos parâmetros de qualidade sonora. A fonte DO6, nos ensaios em que foi utilizada, nunca ficou muito longe do receptor, contrariamente ao primeiro tipo de medições em que este fator é impossível de controlar;
- A não existência de outros difusores em funcionamento, simultaneamente, é favorável aos parâmetros de qualidade sonora. Nas medições com a fonte DO6 não coexistiu nenhum outro aparelho a emitir sinal, mas nos ensaios com o sistema eletroacústico havia várias colunas de som a emitir ao mesmo tempo.

Face ao exposto no parágrafo acima, é possível afirmar que a superioridade dos valores de L_{Aeq} e de ΔL , aquando a injeção de sinal pela fonte DO6, não justifica resultados piores, relativamente às medições com o sistema eletroacústico. Contudo, em ambas as avaliações, na ausência de injeção de sinal, verificaram-se valores entre 58 dB(A) e 60 dB(A), o que se pode traduzir em desconforto para os utilizadores da estação de Aveiro.

5.2 Sugestões de Reabilitação Acústica

5.2.1 Aplicações Correntes

Quando se trabalha no âmbito do condicionamento acústico de determinado espaço, a preocupação primordial é o seu ambiente interior. Desta forma, a correção das suas

insuficiências acústicas não passa por uma reabilitação estrutural, mas por uma alteração ao nível dos seus acabamentos; o comportamento acústico melhora se as superfícies absorventes forem devidamente ajustadas ao volume. Atualmente, os materiais absorventes mais utilizados nesta área subdividem-se em três categorias, de acordo com a sua eficácia nas várias frequências – Figura 5.1.

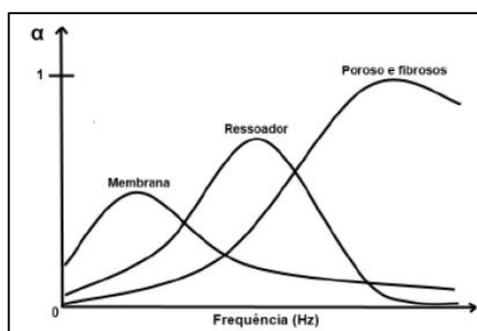


Figura 5.1 - Variação da absorção das soluções construtivas em frequência (Ribeiro, 2017)

- Materiais porosos ou fibrosos que se revelam mais eficazes nas altas frequências e em que a absorção sonora se dá no instante de vibração do material, devido à viscosidade e atrito internos e na fase de propagação por causa do atrito do ar. A eficácia do sistema é garantida quando este é disposto de maneira a que a velocidade de vibração das partículas do ar seja maior, reduzindo a energia cinética correspondente. Ainda assim, os materiais porosos ou fibrosos podem ser também eficientes em frequências mais baixas se a espessura da solução for aumentada. Nesta categoria inserem-se as lãs minerais de rocha e de vidro, as alcatifas e tecidos, as espumas de poliuretano flexível e as mantas de fibra poliéster. Um obstáculo ao sucesso desta estratégia são as tintas que, devido à capilaridade, podem diminuir a porosidade dos materiais (Mateus, 2008; Patrício, 2018).

- Ressonadores que atuam no domínio das frequências médias (dos 400 Hz aos 1000 Hz) e que são denominados de Ressonadores de *Helmholtz*. São constituídos por uma cavidade e por uma abertura onde as ondas sonoras incidem, transmitindo conseqüentemente deslocamentos ao ar interior. Desta forma, e devido ao atrito do ar nas superfícies da cavidade, dissipa-se energia. Habitualmente, estas soluções são compostas por painéis ranhurados ou perfurados e por uma caixa de ar vazia (Bastos, 2010; Mateus, 2008).

- Membranas utilizadas nas baixas frequências e que se definem como placas finas e flexíveis, separadas do elemento de suporte por apoios. O painel e a sua caixa de ar funcionam

como um sistema elástico integrado que, ao ser atingido por uma onda sonora, vibra, e atenua o fenómeno da reflexão, através da dissipação por energia cinética (Mateus, 2008; Ribeiro, 2017).

Na prática, a correção acústica não se restringe a uma gama restrita de frequências, tentando satisfazer simultaneamente as baixas, médias e altas frequências. Surgem assim soluções mistas, que garantem uma absorção equilibrada em toda a gama audível: painéis finos ranhurados ou perfurados, constituídos por materiais porosos ou fibrosos na caixa de ar, que, por sua vez, podem ser inseridos à vista, caso se verifique a necessidade de uma maior correção nas altas frequências. Todavia, Bastos (2010) relembra que se devem ter em consideração outros fatores na escolha dos materiais a adotar, como o seu custo de aquisição, de instalação e manutenção, o isolamento térmico, a resistência e o enquadramento estético em cada situação (Bastos, 2010; Mateus, 2008).

A título de exemplo, apresentam-se na Figura 5.2 cinco tipos de soluções existentes no mercado e que serviram de proposta nos estudos de caso da presente dissertação. Todavia, é possível concluir, através da análise do Quadro 5.1, que alguns destes sistemas construtivos têm coeficientes de absorção muito próximos ou superiores a um, devido ao seu processo de avaliação. O seu método de obtenção em câmara reverberante e pela fórmula de Sabine traduz-se em valores de α ampliados e falaciosos que, no presente trabalho, foram atenuados pelo ábaco de correção proposto na Figura 2.5.



Figura 5.2 - Soluções construtivas mistas absorventes existentes no mercado (adaptado de Castelhana e Ferreira, 2011; Pladur, 2010; Silêncio, 2018)

Quadro 5.1 - Variação do coeficiente de absorção em frequência de diferentes soluções construtivas mistas (adaptado de Castelhana e Ferreira, 2011; Pladur, 2010; Silêncio, 2018)

| | 125 Hz | 250 Hz | 500 Hz | 1000 Hz | 2000 Hz | 4000 Hz |
|---|------------------------------|-----------|-----------|------------|------------|------------|
| | $\alpha_{\text{fabricante}}$ | | | | | |
| S1 – CF6 PLUS – PLENO 40 Painéis em MDF com furação redonda de 6 mm e com uma taxa de perfuração de 10.42 % (véu acústico PLUS) | 0.17 | 0.68 | 1.10* | 0.71 | 0.43 | 0.32 |
| S2 – LINEAR ACOUSTICS 50 PLUS - PLENO 400 Painéis em MDF lineares com espessura de régua de 50 mm, afastamento de 12 mm e taxa de perfuração de 19.35 % (sem véu acústico) | 0.72 | 0.83 | 0.77 | 0.56 | 0.45 | 0.51 |
| S3 – PLADUR FON R 8/18 Placas de gesso laminado com perfurações redondas de 8 mm de diâmetro e espaçamento ente si de 18 mm e com 75 mm de lã mineral (plénium = 300 mm) | 0.50 | 1.11* | 0.95 | 0.84 | 0.61 | 0.53 |
| S4 – SILENTIUM PA50 Chapa de aço perfurada com 0,6 mm de espessura, pré-pintada de cor branca e com perfuração de \approx 20% de área exposta; inclui absorvente interior em lã mineral de 50 mm de espessura e um véu protetor | 0.12 | 0.55 | 0.99 | 0.95 | 0.75 | 0.69 |
| S5 – CF6 PLUS – PLENO 400 Painéis em MDF com furação redonda de 6 mm e com uma taxa de perfuração de 10,42% (véu acústico PLUS) | 0.76 | 0.88 | 0.84 | 0.70 | 0.47 | 0.35 |
| *Valor teoricamente impossível que deve ser reduzido para 1 | | | | | | |

É ainda importante referir que quando se altera o comportamento acústico de uma sala, através da introdução de sistemas construtivos absorventes, não se atua apenas ao nível da reverberação, assistindo-se também a uma diminuição do nível de ruído. Esta ΔL pode ser obtida a partir da Equação (12), que é válida em campo afastado da fonte sonora.

$$\Delta L = 10 \log \left(\frac{TR_{\text{final}}}{TR_{\text{inicial}}} \right) \quad (12)$$

com:

ΔL – variação de ruído em dB(A)

TR_{final} – tempo de reverberação final (s)

TR_{inicial} - tempo de reverberação inicial (s)

5.2.2 Estação Ferroviária de Coimbra-B – Estudo de Caso I

A sala de espera e bilheteira da Estação Ferroviária de Coimbra-B revelou problemas acústicos ao nível da reverberação. Para diminuir o seu TR, para o valor permitido pela legislação portuguesa (0.9 segundos), foram simuladas aplicações das cinco soluções construtivas apresentadas na secção anterior, com as respetivas atenuações do ábaco de correção.

Primeiramente, simulou-se a aplicação dos vários sistemas no teto (107 m²), com exceção das soluções 1 e 4 que, segundo as informações técnicas, não se adequam a este tipo de superfície – Quadro 5.2 e Figura 5.3. Após o cálculo do tempo de reverberação médio para as bandas de 500 Hz, 1 kHz e 2kHz, concluiu-se que a adoção da solução 3 garantiria um TR de 0.9 segundos, mas que as soluções 2 e 5 não seriam suficientes, no teto, tendo em conta as exigências – Quadro 5.3.

Do ponto de vista económico, estudou-se a viabilidade de aplicação dos sistemas numa superfície menor. Por se optar por uma das paredes da sala (82 m²), consequentemente, excluiu-se a proposta 3 *PLADUR FON R 8/18* (esta solução construtiva não seria uma opção viável, tendo em conta o tipo de espaço em análise) e as soluções 2 e 5 (não indicadas para paredes segundo os catálogos técnicos) – Quadro 5.2 e Figura 5.4. No final, foi possível concluir que a dimensão da superfície não é suficiente para que algumas das soluções cumprissem o tempo de reverberação regulamentado – Quadro 5.3.

Quadro 5.2 - Variação de TR em bandas de oitava após aplicação das soluções

| | 125 Hz | 250 Hz | 500 Hz | 1000 Hz | 2000 Hz | 4000 Hz |
|--|--------|--------|--------|---------|---------|---------|
| | TR (s) | | | | | |
| Resultados Iniciais | 1.7 | 1.8 | 2.3 | 2.4 | 2.1 | 1.8 |
| Aplicação dos Sistemas Construtivos no Teto | | | | | | |
| S2 | 0.8 | 0.8 | 0.9 | 1.0 | 1.0 | 0.9 |
| S3 | 0.9 | 0.8 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 0.9 |
| S5 | 0.8 | 0.9 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 |
| Aplicação dos Sistemas Construtivos na Parede | | | | | | |
| S1 | 1.3 | 1.0 | 1.0 | 1.1 | 1.2 | 1.2 |
| S4 | 1.3 | 1.0 | 1.0 | 1.1 | 1.0 | 1.0 |

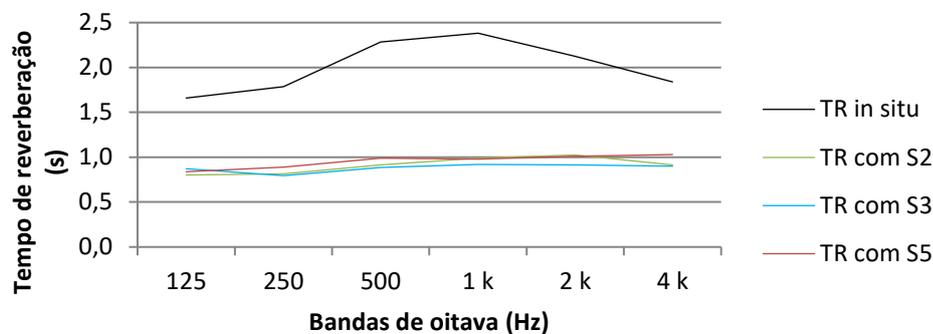


Figura 5.3 - TR após aplicação das soluções no teto da sala de espera e bilheteira

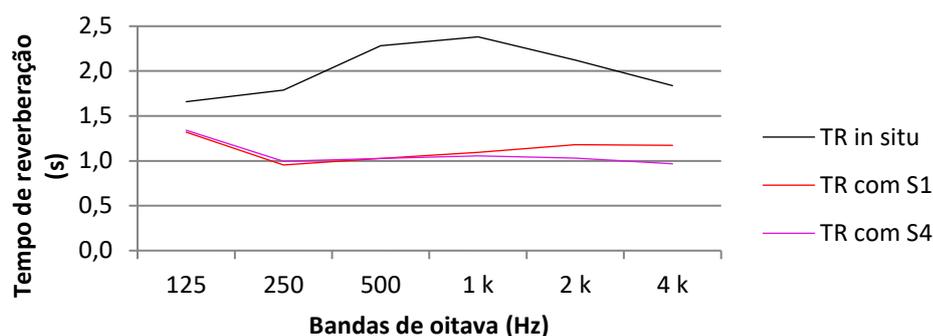


Figura 5.4 - TR após aplicação das soluções na parede frontal da sala de espera e bilheteira

Quadro 5.3 - Valor de $TR_{\text{médio}}$ para as bandas de 500 Hz, 1 kHz e 2 kHz

| $TR_{\text{médio}}$ (500, 1k, 2k (Hz)) (s) | Tempo de Reverberação Inicial | | | | |
|--|-------------------------------|-----|-----|-----|-----|
| | S1 | S2 | S3 | S4 | S5 |
| | 1.7 | | | | |
| Aplicação dos Sistemas Construtivos no Teto | - | 1.1 | 0.9 | - | 1.0 |
| Aplicação dos Sistemas Construtivos na Parede | 1.1 | - | - | 1.0 | - |

Relativamente ao ruído ambiente, concluiu-se que a diminuição deste é tanto maior quanto o decréscimo do TR; as únicas soluções, vistas anteriormente, que cumpririam as condições de reverberação exigidas teriam maiores ΔL e superiores a 3 dB(A) – Quadro 5.4.

Quadro 5.4 - Variação do nível de ruído com a aplicação dos sistemas construtivos

| | ΔL (dB(A)) | | | | |
|--|--------------------|----|----|----|----|
| | S1 | S2 | S3 | S4 | S5 |
| Aplicação dos Sistemas Construtivos no Teto | - | -2 | -3 | - | -2 |
| Aplicação dos Sistemas Construtivos na Parede | -2 | - | - | -2 | - |

5.2.3 Estação Ferroviária de Aveiro - Estudo de Caso II

Analogamente ao que se registou no estudo de caso I, também no estudo de caso II se verificaram incumprimentos legais ao nível da reverberação, na sala de espera e no átrio nascente.

Ainda que alguns pontos de medição, neste estudo de caso, apresentem uma volumetria superior a 500 m³ e que fosse adequado um ábaco de maior correção (inexistente) utilizou-se o apresentado na Figura 2.5.

Na sala de espera, tendo o objetivo de diminuir o TR para 0.8 segundos, propuseram-se várias alternativas. Primeiramente, simulou-se a colocação das soluções construtivas 2, 3 e 5 no teto (71 m²) – Quadro 5.5 e Figura 5.5 – tendo-se verificado que 71 m² seriam insuficientes com a adoção da S2 e da S5, mas que a utilização de S3 daria valores positivos – Quadro 5.6. Avaliou-se ainda a hipótese de colocar os sistemas 1 e 4 na parede frontal da sala – Quadro 5.5 e Figura 5.6 – mas, como as suas dimensões são relativamente pequenas (36 m²), os resultados apresentados foram bastante insatisfatórios - Quadro 5.6.

Quadro 5.5 - Variação de TR em frequência após aplicação das soluções na sala de espera

| | 125 Hz | 250 Hz | 500 Hz | 1000 Hz | 2000 Hz | 4000 Hz |
|--|--------|--------|--------|---------|---------|---------|
| | TR (s) | | | | | |
| Resultados Iniciais | 2.1 | 1.5 | 1.8 | 1.9 | 1.8 | 1.5 |
| Aplicação dos Sistemas Construtivos no Teto | | | | | | |
| S2 | 0.9 | 0.8 | 0.8 | 0.9 | 0.9 | 0.8 |
| S3 | 1.0 | 0.7 | 0.8 | 0.8 | 0.8 | 0.8 |
| S5 | 0.9 | 0.8 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 0.9 |
| Aplicação dos Sistemas Construtivos na Parede | | | | | | |
| S1 | 1.7 | 1.0 | 1.1 | 1.2 | 1.2 | 1.1 |
| S4 | 1.7 | 1.1 | 1.1 | 1.1 | 1.1 | 1.0 |

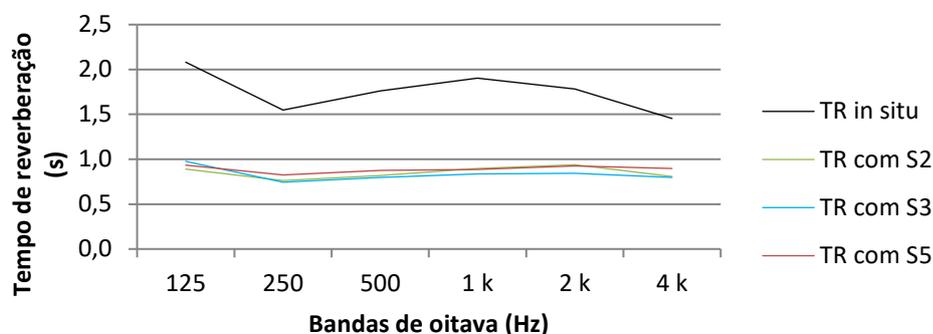


Figura 5.5 - TR após aplicação das soluções no teto da sala de espera

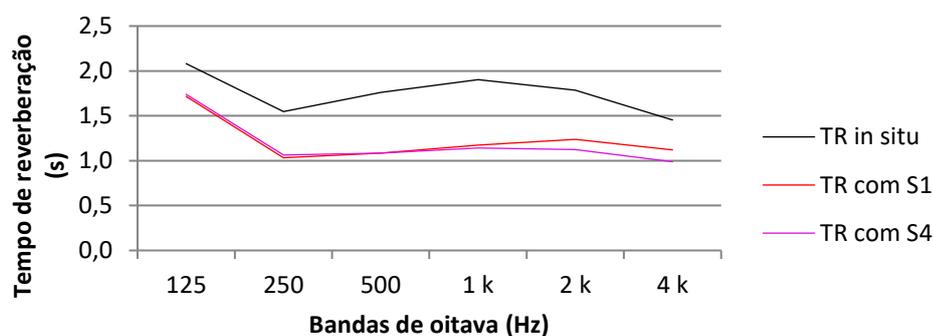


Figura 5.6 - TR após aplicação das soluções na parede frontal da sala de espera

Quadro 5.6 - Valor de $TR_{médio}$ para as bandas de 500 Hz, 1 kHz e 2 kHz

| $TR_{médio}$ (500, 1k, 2k (Hz)) (s) | Tempo de Reverberação Inicial | | | | | 1.4 | | | | |
|--|--|--|--|--|-----|-----|-----|-----|----|-----|
| | | | | | | S1 | S2 | S3 | S4 | S5 |
| | Aplicação dos Sistemas Construtivos no Teto | | | | | - | 0.9 | 0.8 | - | 0.9 |
| Aplicação dos Sistemas Construtivos na Parede | | | | | 1.2 | - | - | 1.1 | - | |

Na sala de espera, registaram-se valores de ruído residual que podem mascarar as mensagens sonoras e torná-las impercetíveis. A aplicação dos materiais absorventes propostos traduzir-se-ia numa melhoria deste parâmetro, mas ao TR exigido pela legislação teria que corresponder um ΔL superior a 2 dB(A) - Quadro 5.7.

Quadro 5.7 - Variação do nível de ruído com a aplicação das soluções

| | ΔL (dB(A)) | | | | |
|--|--------------------|----|----|----|----|
| | S1 | S2 | S3 | S4 | S5 |
| Aplicação dos Sistemas Construtivos no Teto | - | -2 | -2 | - | -2 |
| Aplicação dos Sistemas Construtivos na Parede | -1 | - | - | -1 | - |

Com um pé direito de, aproximadamente, 16 metros, o átrio nascente revelou-se o espaço com mais insuficiências ao nível da reverberação. Um requisito de 1.6 segundos levaram à necessidade de propostas de intervenção, ao nível do teto (144 m²) e da parede (219 m²) – Quadro 5.8, Figura 5.7 e Figura 5.8. Concluiu-se que nenhuma das superfícies tem dimensões suficientes para que as soluções construtivas sejam eficazes – Quadro 5.9 – pelo que se optou por propor a aplicação da solução 1 e da solução 5, uma permitida para tetos e outra para paredes, nessas mesmas. Desta forma, o TR seria de 1.6 segundos, valor igual ao exigido pela legislação nacional.

Quadro 5.8 - Variação de TR em frequência após aplicação das soluções no átrio nascente

| | 125 Hz | 250 Hz | 500 Hz | 1000 Hz | 2000 Hz | 4000 Hz |
|--|--------|--------|--------|---------|---------|---------|
| | TR (s) | | | | | |
| Resultados Iniciais | - | - | 4.7 | 3.9 | 3.8 | 2.8 |
| Aplicação dos Sistemas Construtivos no Teto | | | | | | |
| S2 | - | - | 2.7 | 2.5 | 2.6 | 2.0 |
| S3 | - | - | 2.6 | 2.4 | 2.4 | 2.0 |
| S5 | | | 2.8 | 2.5 | 2.5 | 2.2 |
| Aplicação dos Sistemas Construtivos na Parede | | | | | | |
| S1 | - | - | 2.1 | 2.0 | 2.2 | 2.0 |
| S4 | - | - | 2.1 | 1.9 | 2.0 | 1.7 |
| Aplicação dos Sistemas Construtivos no Teto e na Parede | | | | | | |
| S1+S5 | - | - | 1.6 | 1.5 | 1.7 | 1.6 |

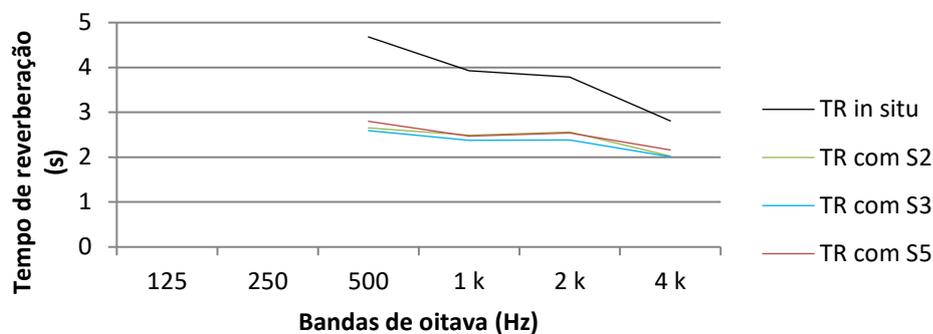


Figura 5.7 - TR após aplicação das soluções no teto do átrio nascente

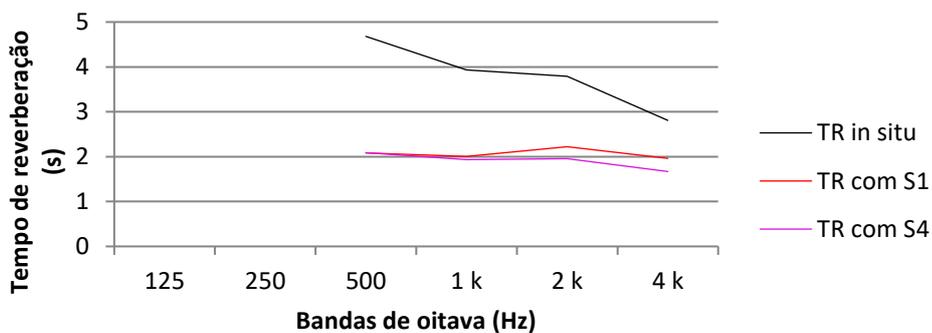


Figura 5.8 - TR após aplicação das soluções na parede do átrio nascente

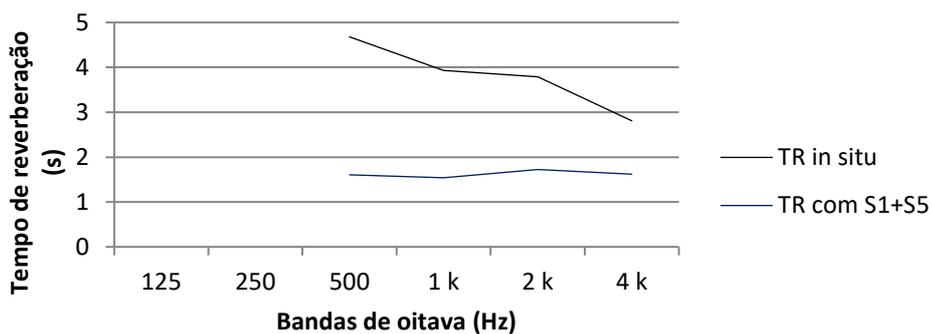


Figura 5.9 - TR após aplicação das soluções no teto e na parede do átrio nascente

Quadro 5.9 - Valor de $TR_{\text{médio}}$ no átrio nascente para as bandas de 500 Hz, 1 kHz e 2 kHz

| $TR_{\text{médio}}$ (500, 1k, 2k (Hz)) (s) | Resultado Inicial | 3.1 | | | | | |
|--|--|-----|-----|-----|-----|-----|-------|
| | | S1 | S2 | S3 | S4 | S5 | S1+S5 |
| | Aplicação dos Sistemas Construtivos no Teto | - | 2.6 | 2.4 | - | 2.6 | - |
| | Aplicação dos Sistemas Construtivos na Parede | 2.1 | - | - | 2.0 | - | - |
| | Aplicação dos Sistemas Construtivos no Teto e na Parede | - | - | - | - | - | 1.6 |

Ainda que todas as propostas possibilitassem um decréscimo do ruído, só a diminuição de 3 dB(A), devido à última estratégia de reabilitação, corresponderia a um tempo de reverberação cumprido legalmente – Quadro 5.10.

Quadro 5.10 - Variação do nível de ruído com a aplicação das soluções no átrio nascente

| | ΔL (dB(A)) | | | | | |
|--|--------------------|----|----|----|----|-------|
| | S1 | S2 | S3 | S4 | S5 | S1+S5 |
| Aplicação dos Sistemas Construtivos no Teto | - | -1 | -1 | - | -1 | - |
| Aplicação dos Sistemas Construtivos na Parede | -2 | - | - | -2 | - | - |
| Aplicação dos Sistemas Construtivos no Teto e na Parede | - | - | - | - | - | -3 |

6 CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

A planificação prévia da presente dissertação levou à proposta das duas fases de trabalho agora concluídas. Num primeiro momento, foi realizada uma pesquisa de conceitos e definições no âmbito da Acústica, bem como uma revisão bibliográfica de outros estudos de caso, classificados como espaços de circulação e comunitários. Posteriormente, foram caracterizadas duas estações ferroviária portuguesas – Aveiro e Coimbra-B – através da análise de alguns parâmetros de qualidade sonora – TR, D_{50} , RASTI e STI. Os valores insatisfatórios, obtidos em alguns dos espaços analisados, levaram, então, à proposta final de algumas sugestões de reabilitação acústica.

A elaboração deste trabalho permitiu retirar algumas conclusões relativamente ao ambiente acústico das estações ferroviárias analisadas.

As plataformas não revelam problemas ao nível da reverberação, por serem, na sua maioria, espaços exteriores. Contudo, a passagem de comboios interfere no valor dos seus parâmetros acústicos; o decréscimo de 10 % a 30 % do D_{50} , do RASTI e do STI pode ser justificado pela diminuição da relação sinal/ruído.

Relativamente às salas de espera e aos restantes espaços de circulação, concluiu-se que a inexistência de superfícies absorventes e as volumetrias, em alguns casos muito elevadas, são os grandes obstáculos à garantia de um ambiente sonoro adequado. Desta forma, o tempo de reverberação não cumpre, frequentemente, o valor indicado na legislação e os vários parâmetros sonoros (principalmente o D_{50}) revelam-se insatisfatórios.

É ainda possível percecionar, com muita regularidade, nas zonas acima referidas, um ruído ambiente significativamente alto. A coexistência de múltiplas fontes de ruído, principalmente provenientes dos utentes e da circulação ferroviária, pode originar valores de L_{Aeq} , claramente, acima dos 60 dB(A).

A realização de medições, nos vários espaços dos estudos de caso, tanto com a fonte sonora normalizada como com os próprios sistemas eletroacústicos, possibilitou, assim, a verificação complementar de alguns pontos:

-
- Tendencialmente, quanto maior a diferença ΔL melhor são os valores dos parâmetros acústicos, devido à maior relação sinal/ruído. No caso dos sistemas eletroacústicos, esta relação, muitas vezes, não é suficientemente elevada;
 - É necessária uma adequada distância entre a fonte sonora e o recetor para que se obtenham valores razoáveis dos parâmetros sonoros. Os sistemas das estações devem estar convenientemente posicionados para que a difusão das suas mensagens sonoras seja perceptível a todos os utilizadores;
 - A simultaneidade dos vários difusores de mensagens pode dificultar a perceptibilidade e o bom ambiente sonoro dos espaços.

As sugestões de reabilitação acústica apresentadas revelaram-se, no geral, satisfatórias. A aplicação das soluções construtivas no teto e nas paredes dos vários espaços traduzir-se-ia em decréscimos no tempo de reverberação e nos níveis de ruído ambiente. Para salas com menor volumetria (nos casos analisados entre 284 m³ e os 428 m³), uma aplicação de 71 m² a 107 m² da solução com placas de gesso laminado (S3) seria suficiente para que se cumprisse o tempo de reverberação regulamentado. Já em zonas de maiores dimensões, (medições realizadas num espaço com 2304 m³ e um pé direito de 16 m), a solução passaria por aplicar a S1 em conjunto com a S5 em pelo menos 363 m² da superfície. Numa próxima fase de desenvolvimento, seria ainda interessante perceber que influências teriam estas propostas de reabilitação, nos restantes parâmetros de qualidade sonora, avaliados ao longo da dissertação.

É necessário que, futuramente, mais estações ferroviárias sejam analisadas do ponto de vista acústico. A caracterização das estações, diferentes em termos de tipologia e data de construção, permitiria obter mais conclusões, no que respeita ao conteúdo abordado neste estudo. Posteriormente, seria igualmente útil perceber a viabilidade de outras soluções construtivas para a reabilitação acústica das estações.

A falta de informação, no âmbito académico, sobre o assunto explanado na presente dissertação justificam que esta se constitua como uma chamada de atenção para o tema do ambiente sonoro nas estações de caminho de ferro. A importância deste trabalho é ainda fundamentada pela ausência de sensibilidade para com estes espaços, vistos ainda e tão-só como meros lugares de passagem e não como zonas comunitárias, onde um grande número pessoas passa uma parte significativa do seu dia, seja como utentes ou como trabalhadores.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agência Portuguesa do Ambiente, Mapa Estratégico de Ruído das Grandes Infra-estruturas de Transporte Ferroviário: Linha do Norte (entre St.^a Apolónia e Azambuja), julho de 2008, disponível em http://www.apambiente.pt/_zdata/DAR/Ruido/SituacaoNacional/Mapas_GITs_Ferrovuario/RNT_Norte_troco_Sta_Apolonia_Azambuja.pdf, data da consulta: março de 2018.
- Agência Portuguesa do Ambiente, Grandes Infraestruturas de Transporte Ferroviárias (GITf), dezembro de 2017, disponível em <https://apambiente.pt/index.php?ref=16&subref=86&sub2ref=531>, data da consulta: abril de 2018.
- Alves, R. M. V. (2015) "Arquitetura, Cidade e Caminho de Ferro: as transformações urbanas planeadas sob a influência do caminho de ferro - Volume I", Tese de Doutoramento, Departamento de Arquitectura, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Bastos, L. J. R. (2010) "Qualidade Acústica de Auditórios", Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro, Aveiro.
- Beranek, L. L. (1960). "Noise reduction: prepared for a special summer program at the Massachusetts Institute of Technology". New York.
- Braga, S. M. F. P. (2014) "A Acústica de Grandes e Reverberantes Espaços de Circulação - Caso de Estudo: Edifício B (FEUP)", Tese de Mestrado Integrado, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.
- Bravo, M. A. M., Fernández A. I. T., Alejo, V. A., García, R. O. (2010), "Características Acústicas en Restaurantes: Tiempo de Reverberación", 41º Congreso Nacional de Acústica, 6º Congreso Ibérico de Acústica, León.
- Carvalho, A. P. O., Garcia, L. M. M. (2012), "A Acústica do Museu Nacional Soares dos Reis, Porto", VIII Congresso Ibero-americano de Acústica, Évora, Portugal.
- Carvalho, A. P. O., Nascimento, B. F. O. (2010), "A Acústica das Capelas Subterrâneas da Nova Igreja da Santíssima Trindade, Fátima", 41º Congreso Nacional de Acústica, 6º Congreso Ibérico de Acústica, León.
- Carvalho, A. P. O., Pereira, C. F. R. T. (2015). " Caracterização Acústica de Grandes Centros Comerciais", 46º Congreso Español de Acústica, Encuentro Ibérico de Acústica, European Symposium on Virtual Acoustics and Ambisonics, TecniAcustica, Valencia.
- Castelhano e Ferreira, (2011). "Acústica XXI - Sistemas de Condicionamento Acústico". Castelhano e Ferreira, Leiria.
- D'Almeida, J. M. A. M. (2018) "Reabilitação Acústica em Edifícios de Valor Histórico:

-
- Estratégias para Melhoria do Condicionamento Acústico de Espaços", Tese de Mestrado em Eficiência Acústica e Energética para uma Construção Sustentável, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Documento Básico HR - Protección Frente al Ruido, setembro de 2009.
- DRE, aprovado pelo Decreto-lei nº 146/2006 de 31/07, com a nova redação dada pela Declaração de Rectificação nº 57/2006 de 31/08.
- E.P.E., Comboios de Portugal (2018). "Aveiro". Comboios de Portugal E.P.E., Lisboa.
- E.P.E., Comboios de Portugal (2018). "Coimbra - B". Comboios de Portugal E.P.E., Lisboa.
- Google Maps, <https://www.google.com/maps>, data da consulta: maio de 2018.
- Infraestruturas de Portugal, S.A. (IP), 2019 Diretório da Rede, 7 de dezembro de 2017, disponível em <http://www.infraestruturasdeportugal.pt/rede/ferroviaria/diretorio-da-rede>, data da consulta: abril de 2018.
- Infraestruturas de Portugal, S.A. (IP), <http://www.infraestruturasdeportugal.pt>, data da consulta: abril de 2018.
- Infraestruturas de Portugal, S.A. (IP), Plano de Investimentos em Infraestruturas - Ferrovia 2020: Modernização da Linha do Norte, 12 de abril de 2017, disponível em <http://www.infraestruturasdeportugal.pt/ferrovia-2020/corredor-internacional-norte>, data da consulta: abril de 2018.
- Instituto do Ambiente (IA), O Ruído e a Cidade, janeiro de 2004, disponível em <https://www.apambiente.pt/index.php?ref=16&subref=86&sub2ref=529>, data da consulta: fevereiro de 2018.
- IP Património, Estações Ferroviárias, 17 de dezembro de 2014, disponível em <http://www.ippatrimonio.pt/centro-de-imprensa/estacoes-ferroviarias>, data da consulta: fevereiro de 2018.
- Isbert, A. C. (1998). "Diseño acústico de espacios arquitectónicos". Universitat Politècnica de Catalunya, SL, Barcelona.
- Lebo, C. P., Smith, M. F. W., Mosher, E. R., Jelonek, S. J., Schwind, D. R., Decker, K. E., Krusemark, H. J., Kurz, P. L. (1994). "Restaurant noise, hearing loss, and hearing aids". The Western Journal of Medicine, Vol. 161, Nº1, pp. 45-49.
- Li H., Peng W., Xiang Y., Wenjun Z. (2016). "Researches on Sound Environment in Futian Underground Railway Station". ScienceDirect, Procedia Engineering, 165, pp. 730 – 739.
- Macedo, A. M. Á. (2015) "Caracterização Acústica de Conchas Acústicas ao Ar Livre", Tese de Mestrado Integrado, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.
- Mateus, D. (2008). "Acústica de Edifícios e Controlo de Ruído". Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.
- Mateus, D. (2017). "Introdução e Enquadramento à Acústica de Espaços Fechados". Curso de Formação Avançada em Acústica de Edifícios, Departamento de Engenharia Civil da
-

-
- Universidade de Coimbra, edição de 2017/2018, Coimbra.
- Mateus, D., Marinho, A., Pereira, A. (2012), "Aplicabilidade da Fórmula de Sabine a Espaços com Elevada Absorção Sonora: Proposta de Prévia Correção de Coeficientes de Absorção Sonora, VIII Congresso Ibero-americano de Acústica, Évora, Portugal.
- Mateus, D., Pereira, A. (2017), "Avaliação da Influência do Desenho de uma Sala na sua Qualidade Acústica – o Caso de Estudo de um Teatro com 760 Lugares em Coimbra", 48º Congreso Español de Acústica, Encuentro Ibérico de Acústica, European Symposium on Underwater Acoustics Applications, European Symposium on Sustainable Building Acoustics, A Coruna.
- Moreira, P. F. J. (2017) "Acústica de Infantários - Caso de Estudo: Associação Infantário e Jardim de Infância Carolina Michaëlis", Tese de Mestrado Integrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.
- Norma ISO 3382-1:2009 (2009), "Acoustics - Measurement of room acoustic parameters - Part 1: Performance spaces".
- Ortins, S. C. (2016) "Acústica em Open-Space", Tese de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.
- Patrício, J. (2014). "Reabilitação Acústica". 3ª edição, Lisboa.
- Patrício, J. (2018). "Acústica nos Edifícios". Publindústria, Edições Técnicas, 7ª Edição, Revista e Aumentada, Porto.
- Pereira, C. F. R. T. (2015) "Caracterização Acústica de Grandes Centros Comerciais - Centros Comerciais do Grande Porto", Tese de Mestrado Integrado, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.
- Pereira, L. M. N. M. (2010) "Previsão e Medição do Comportamento Acústico de Espaços", Tese de Mestrado, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Trás-os-Montes e Alto Douro.
- Pinho, P.G., Pinto, M., Almeida, R.M.S.F., Lopes, S.M., Lemos, L.T. (2014), "Avaliação do Ruído em Refeitórios Escolares", 45º Congreso Español de Acústica, 8º Congreso Ibérico de Acústica, European Symposium on Smart Cities and Environmental Acoustics, TechniAcustica, Murcia.
- Pladur, Pladur Fon - Placas para soluções acústicas e decorativas, setembro de 2010, disponível em: <http://www.pladur.pt/es-es/arquitectos/documentacion-tecnica/Documentos Tecnicos/PladurFon.pdf>, data da consulta: outubro de 2018.
- RGR - "Regulamento Geral do Ruído", aprovado pelo Decreto-lei nº 9/2007 de 17 de janeiro.
- Ribeiro, D. F. C. (2017) "Reabilitação Acústica em Cantinas Escolares - Caso de Estudo: Cantina da FEUP", Tese de Mestrado Integrado, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.
- RRAE – "Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios", aprovado pelo Decreto-lei nº 129/2002 de 11 de maio, com a nova redação dada pelo Decreto-lei nº 96/2008 de 9 de junho.
-

-
- Silêncio, Paineis Absorventes Acústicos - SILENTIUM PA50, 2018, disponível em <https://www.silentium.pt/silentium-pa50/>, data da consulta: outubro de 2018.
- Silva, T. D. C., (2012) "Acústico de Salas de Concertos – Estudo Aplicado ao Auditório do Conservatório de Música de Coimbra", Tese de Mestrado Integrado, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Tadeu, A., Mateus, D., António, J., Godinho, L., Mendes, P. A. (2010). "Acústica Aplicada". Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Tamanini, C. A. M., Ramires, F., Monteiro, J. L., Bistafa, S. R. (2008). "O conforto acústico como fundamento de projeto: O caso do Teatro de São José dos Campos", VI Congresso Iberoamericano de Acústica - FIA 2008, Buenos Aires.
- Zelem, L., Chmelík, V., Rychtáriková, M., Glorieux, C. (2016). "Analysis of the Acoustic Behavior of People in a Restaurant", EuroRegio2016, Porto, Portugal.