



M 2018

U. PORTO
FEUP FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

MELHORIA DO DESEMPENHO ACÚSTICO DE UMA SALA DE AULA COM MATERIAIS DE DESPERDÍCIO

ANA SOFIA MENDES PESSOA

DISSERTAÇÃO DE Mestrado APRESENTADA

À FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO EM
ENGENHARIA CIVIL

MELHORIA DO DESEMPENHO ACÚSTICO DE UMA SALA DE AULA COM MATERIAIS DE DESPERDÍCIO

ANA SOFIA MENDES PESSOA

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM CONSTRUÇÕES

Orientador: Professor Doutor António Pedro Oliveira de Carvalho

Coorientadora: Professora Doutora Ana Sofia Moreira dos Santos
Guimarães Teixeira

JUNHO DE 2018

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2017/2018

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2017/2018 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2018.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

A quem sempre me apoia

*O conhecimento é uma ferramenta, e como todas as ferramentas,
o seu impacto está nas mãos de quem o usa.
Dan Brown*

AGRADECIMENTOS

Ao terminar este trabalho quero manifestar o meu sincero agradecimento a todos os que desde o início do meu percurso académico e em particular nestes cinco meses, contribuíram para a concretização desta importante etapa.

Agradeço ao Professor António Pedro Carvalho e à Professora Ana Sofia Guimarães pela disponibilidade, motivação e apoio demonstrados, sem os quais este trabalho não seria possível.

Agradeço ao Engenheiro Eduardo Costa pelo entusiasmo, disponibilidade e ajuda na realização das medições acústicas.

Agradeço ao Grupo Futurocol e à Confeitaria e Padaria Ideal pela simpatia com que me receberam e forneceram as espumas e os tabuleiros para ovos, respetivamente, e à Natália Madureira pela cedência da carrinha para transportar as amostras de materiais de desperdício.

Agradeço aos estudantes do *Civil'in*, tutores e tutorandos, pela ajuda na preparação das amostras.

Agradeço à junta de freguesia de Santiago de Candoso e ao Engenheiro Mário Roriz pela disponibilização da sala de aula da Escola Básica do 1.º Ciclo de Santiago de Candoso (Guimarães) e pelo acompanhamento dos ensaios realizados.

E por fim um agradecimento muito especial aos meus amigos, em particular à minha família e ao meu namorado, pelo constante apoio, incentivo, conselhos, paciência e carinho com que sempre me inspiram a fazer melhor.

RESUMO

A acústica no contexto escolar desempenha um papel fundamental na transmissão de conhecimentos e experiências que definem o desenvolvimento integral dos estudantes. Assim, a presente dissertação propõe-se analisar possíveis melhorias do desempenho acústico de uma sala de aula da Escola Básica do 1.º Ciclo de Santiago de Candoso (Guimarães), encerrada por falta de condições de conforto térmico e acústico, recorrendo a materiais de desperdício não orgânico. Nessa perspetiva, menciona os principais conceitos acústicos que servem de suporte à avaliação da análise do conforto acústico em salas de aula, identifica e analisa legislações e normalizações bem como estudos acústicos considerados pertinentes e indica os parâmetros acústicos que devem ser considerados neste estudo. Além disso, trata a tipologia das escolas primárias portuguesas e, em particular, as vantagens da utilização de alguns materiais de desperdício na melhoria do desempenho acústico.

Como instrumentos de investigação, realizaram-se medições *in situ* dos parâmetros *rapid speech transmission index* (RASTI), tempo de reverberação (T) e nível sonoro contínuo equivalente de ruído de fundo (LAeq(rf)) antes e após a intervenção com os materiais de desperdício selecionados para integração na sala de aula (copos plásticos de café furados na base, tabuleiros para ovos e espumas de colchões). No sentido de complementar o estudo *in situ* determinaram-se ainda os coeficientes de absorção sonora dos materiais de desperdício em estudo, através de ensaios na câmara reverberante do Laboratório de Acústica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (LAfeup).

Os resultados revelaram que as propostas de reabilitação acústica implementadas permitem reduzir o tempo de reverberação de 1,5 s para 0,9 s na melhor solução ensaiada (espumas de colchões colocadas na parte superior das paredes do fundo da sala) e consequentemente melhoram a inteligibilidade da palavra na sala de aula de *suficiente* para *boa*. O valor regulamentar português para a sala de aula estudada corresponde a um $T_{\text{médio}} (500 - 2k \text{ Hz})$ inferior ou igual a 0,8 s e cumpriu-se após a reabilitação, tendo em conta a incerteza de 25% do limite regulamentar que o Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios (RRAE) aceita. Adicionalmente, este estudo recomenda para salas de aula do 1.º ciclo do ensino básico valores do T entre 0,4 e 0,6 s, LAeq(rf) inferior ou igual a 35 dB(A) e RASTI superior ou igual a 0,75 (ou outro parâmetro de inteligibilidade da palavra). A reutilização de materiais de desperdício permite ainda uma reabilitação de baixo custo, amiga do ambiente e que, devido à sua simplicidade, possibilita a integração de estudantes na intervenção permitindo a sensibilização para o reaproveitamento de materiais de desperdício e para a importância da acústica em edifícios.

PALAVRAS-CHAVE: acústica, reutilização de materiais de desperdício, inteligibilidade da palavra, tempo de reverberação, sala de aula.

ABSTRACT

Acoustics in a school environment plays a fundamental role in the transmission of knowledge and experiences that define student's development. This dissertation proposes to improve the acoustic performance of a classroom of the Elementary School of Santiago de Candoso (Guimarães - Portugal), closed due to the lack of thermal and acoustic comfort conditions, using inorganic waste materials. In this perspective, mentions the main acoustic concepts that support the acoustic comfort analysis in classrooms, identifies and analyses legislation and normalization as well as relevant acoustic studies and indicates the acoustic parameters that should be considered in this study. In addition, it deals with the typology of portuguese primary schools and, particularly, discusses the advantages of using some waste materials in improving acoustic performance.

As a research instrument, *in situ* measurements of the *rapid speech transmission index* (RASTI), reverberation time (T) and background noise equivalent level (LAeq (rf)) were performed before and after the intervention with the materials selected for integration into the classroom (plastic coffee cups perforated on the base, egg trays and foam mattresses). In order to complement the *in situ* study, the sound absorption coefficients of these waste materials were also determined in University of Porto College of Engineering through tests, in the reverberant chamber of Laboratory of Acoustics (LAfeup).

The results showed that the implemented acoustic rehabilitation proposals allows reverberation time to reduce from 1,5 s to 0,9 s in the best tested solution (mattress foams placed on the back walls of the room) and consequently to improve speech intelligibility in the classroom from *fair* to *good*. The portuguese regulatory value for the studied classroom corresponds to $T_{\text{average (500 - 2k Hz)}}$ less or equal to 0,8 s and it was fulfilled after rehabilitation, considering 25% of uncertainty on the limit regulations that the Portuguese Building Acoustics Regulation (RRAE) allows. In addition, the study recommends $T_{\text{average (500 - 2k Hz)}}$ values between 0,4 and 0,6 s, LAeq(rf) less or equal to 35 dB(A) and RASTI higher or equal to 0,75 (or other speech intelligibility parameter). The waste materials reuse also allows a low-cost environmentally friendly rehabilitation that, due to its simplicity, makes it possible to integrate students into the intervention, allowing awareness to waste materials reuse and the importance of buildings acoustics.

KEYWORDS: acoustics, waste materials reuse, speech intelligibility, reverberation time, classroom.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
ÍNDICE DE FIGURAS	xi
ÍNDICE DE QUADROS	xvii
SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS	xxiii
1 INTRODUÇÃO	1
1.1. ENQUADRAMENTO	1
1.2. ÂMBITO E OBJETIVOS	1
1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	2
2 CONCEITOS ACÚSTICOS	5
2.1. INTRODUÇÃO	5
2.2. SOM E RUÍDO	5
2.3. ACÚSTICA	5
2.4. PRESSÃO SONORA	6
2.5. FREQUÊNCIA	7
2.6. TEMPO	10
2.7. INTENSIDADE E POTÊNCIA SONORA	11
2.8. RUÍDOS BRANCO E ROSA	12
2.9. CORREÇÃO ACÚSTICA E ISOLAMENTO SONORO	13
2.10. ABSORÇÃO SONORA	13
2.11. TEMPO DE REVERBERAÇÃO	16
2.12. MATERIAIS E SISTEMAS ABSORVENTES SONOROS	19
2.13. CAMPO DIRETO E CAMPO REVERBERADO	23
2.14. FONTES DE RUÍDO EM SALAS DE AULA	24
2.15. INTELIGIBILIDADE DA PALAVRA	25
2.16. SÍNTESE DO CAPÍTULO	26
3 ACÚSTICA DE SALAS DE AULA	29
3.1. INTRODUÇÃO	29
3.2. VALORES PRESENTES NA LEGISLAÇÃO E NORMALIZAÇÃO	29
3.2.1. O CASO PORTUGUÊS	29
3.2.2. REINO UNIDO	30
3.2.3. ESTADOS UNIDOS DA AMÉRICA	31

3.2.4. ESPANHA.....	33
3.2.5. FRANÇA.....	33
3.2.6. POLÓNIA.....	34
3.2.7. BÉLGICA.....	35
3.2.8. NORUEGA.....	35
3.3. VALORES IDEAIS.....	36
3.4. SÍNTESE DO CAPÍTULO.....	38
4 REABILITAÇÃO DE ESCOLAS EM PORTUGAL.....	45
4.1. INTRODUÇÃO.....	45
4.2. PARQUE ESCOLAR PORTUGUÊS.....	45
4.3. MELHORIA DO DESEMPENHO ACÚSTICO NA REABILITAÇÃO DE SALAS DE AULA RECORRENDO A SOLUÇÕES TRADICIONAIS.....	48
4.4. MELHORIA DO DESEMPENHO ACÚSTICO NA REABILITAÇÃO DE SALAS DE AULA RECORRENDO A MATERIAIS DE DESPERDÍCIO.....	52
4.5. SÍNTESE DO CAPÍTULO.....	59
5 METODOLOGIA ADOTADA NO CASO DE ESTUDO.....	61
5.1. INTRODUÇÃO.....	61
5.2. CARACTERIZAÇÃO DA ESCOLA BÁSICA DO 1.º CICLO DE SANTIAGO DE CANDOSO.....	61
5.3. MATERIAIS DE DESPERDÍCIO SELECIONADOS.....	64
5.4. METODOLOGIA ADOTADA E EQUIPAMENTOS UTILIZADOS.....	68
5.4.1. PARÂMETROS ACÚSTICOS MEDIDOS.....	68
5.4.2. CARACTERIZAÇÃO DOS COEFICIENTES DE ABSORÇÃO SONORA DAS AMOSTRAS EM CÂMARA REVERBERANTE.....	68
5.4.3. MEDIÇÃO DO TEMPO DE REVERBERAÇÃO NA SALA DE AULA.....	71
5.4.4. MEDIÇÃO DO RÚIDO DE FUNDO NA SALA DE AULA.....	72
5.4.5. MEDIÇÃO DO RASTI NA SALA DE AULA.....	73
5.4.6. LOCALIZAÇÃO DOS MATERIAIS DE DESPERDÍCIO NA SALA DE AULA.....	75
5.5. SÍNTESE DO CAPÍTULO.....	78
6 RESULTADOS DO CASO DE ESTUDO.....	81
6.1. INTRODUÇÃO.....	81
6.2. RESULTADOS OBTIDOS NA CÂMARA REVERBERANTE DO LAFEUP.....	81
6.3. RESULTADOS DA SITUAÇÃO DE REFERÊNCIA SV1 DA SALA DE AULA.....	84
6.4. RESULTADOS DA SITUAÇÃO DE REFERÊNCIA SV2 DA SALA DE AULA.....	85
6.5. RESULTADOS COM MATERIAIS DE DESPERDÍCIO APLICADOS NA SALA DE AULA.....	87
6.5.1. COPOS DE CAFÉ FURADOS NA BASE (CCF).....	87
6.5.2. TABULEIROS PARA OVOS (TO).....	88
6.5.3. ESPUMAS (E).....	89

6.6. ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS NA CÂMARA REVERBERANTE DO LAFEUP	90
6.7. ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS NAS SITUAÇÕES DE REFERÊNCIA SV1 E SV2 DA SALA DE AULA	91
6.8. ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS COM OS MATERIAIS DE DESPERDÍCIO NA SALA DE AULA	95
6.8.1. TEMPO DE REVERBERAÇÃO.....	95
6.8.2. RASTI.....	97
6.9. SÍNTESE DO CAPÍTULO	98
7 CONCLUSÕES	105
7.1. SÍNTESE DAS CONCLUSÕES OBTIDAS	105
7.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	107
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	109
ANEXO A – REGISTO FOTOGRÁFICO DA EXECUÇÃO DAS AMOSTRAS.....	A.1
ANEXO B – REGISTO DOS RESULTADOS OBTIDOS NA CÂMARA REVERBERANTE.....	B.1
ANEXO C – REGISTO DOS RESULTADOS OBTIDOS NA SALA DE AULA	C.1

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Variação de pressão produzida por uma fonte sonora, som ou ruído (adaptado de [7])	6
Figura 2.2 - Variação em frequência da gama audível (adaptado de [7])	8
Figura 2.3 - Exemplo de espectros sonoros de um mesmo ruído em bandas de 1/1 oitava e de 1/3 de oitava (adaptado de [4])	9
Figura 2.4 - Descrição das curvas de ponderação A, B, C e D (adaptado de [12]).....	9
Figura 2.5 - Modelo de ruído branco com as abcissas em escala: (a) linear; (b) logarítmica (adaptado de [5])	12
Figura 2.6 - Modelo de ruído rosa com as abcissas em escala: (a) linear; (b) logarítmica (adaptado de [5])	12
Figura 2.7 - Mecanismo da absorção, transmissão e reflexão sonora	13
Figura 2.8 - Curva de referência para determinação do coeficiente de absorção sonora ponderado (adaptado de [15])	14
Figura 2.9 - Tubo de ondas estacionárias (adaptado de [4])	15
Figura 2.10 - Esquema de funcionamento do tubo de ondas estacionárias (adaptado de [4])	16
Figura 2.11 - Câmara reverberante com a amostra sobre o pavimento (adaptado de [4])	16
Figura 2.12 - Definição do tempo de reverberação (T): (a) valor teórico; (b) valor determinado por extrapolação do declive (adaptado de [2])	17
Figura 2.13 - Efeito de dois tempos de reverberação distintos (0,5 s a contínuo e 1,5 s a tracejado) na inteligibilidade da palavra <i>back</i> (adaptado de [2]).....	18
Figura 2.14 - Comportamento em frequência do coeficiente de absorção sonora de diferentes materiais absorventes sonoros (adaptado de [4])	19
Figura 2.15 - Exemplo de absorsor suspenso em espuma de resina de melamina (adaptado de [18])	20
Figura 2.16 - Esquema de um ressoador impulsionado por uma onda sonora (adaptado de [19])	20
Figura 2.17 - Esquema de ressoador agrupado (adaptado de [4]).....	21
Figura 2.18 - Exemplo de painéis com superfície perfurada (adaptado de [20])	21
Figura 2.19 - Esquema de membrana ressonante (adaptado de [10])	22
Figura 2.20 - Exemplo de painéis vibrantes em madeira colocados num auditório (adaptado de [21])	22
Figura 2.21 - (a) Influência da distância à fonte sonora e da absorção sonora da sala no campo direto e reverberado; (b) exemplo de campo direto e de campo reverberado (adaptado de [22])	23
Figura 2.22 - (a) Curvas NC; (b) curvas NR (adaptado de [24])	25
Figura 3.1 - Correção acústica ideal para uma sala de aula, com tratamento absorvente de som em três paredes, alcatifa no pavimento, um refletor de teto inclinado na frente e superfícies absorventes de som no teto, exceto no centro onde tem superfícies refletoras (adaptado de [36])	32
Figura 4.1 - Escola de Milhões (Bragança); Edifício de 1 sala, Tipo Xisto; Arquivo Direção-Geral do Equipamento Escolar [64]	46

Figura 4.2 - Escola masculina de Terroso (São Salvador, Póvoa de Varzim); Edifício de 2 salas, simples. Tipo Douro Granito; Arquivo Direcção-Geral do Equipamento Escolar [64]	46
Figura 4.3 - Escola masculina n.º 3 de Vila do Conde; Edifício escolar de 4 salas simples, tipo Douro Granito; Arquivo Direcção-Geral do Equipamento Escolar [64]	46
Figura 4.4 - Mapeamento dos 1829 estabelecimentos de ensino aprovados pelo Programa Nacional de Requalificação da Rede do 1.º Ciclo do Ensino Básico e da Educação Pré-escolar em 2018 [66]	47
Figura 4.5 - Perspetiva descendente do auditório: (a) antes da intervenção; (b) após a intervenção realizada (adaptado de [70])	50
Figura 4.6 - Perspetiva ascendente do auditório: (a) antes da intervenção; (b) após a intervenção realizada (adaptado de [70])	50
Figura 4.7 - Pormenor do teto das salas de aula e dos corredores dos pisos 1 e 0 da Escola Secundária Rodrigues de Freitas (sem escala, adaptado de [72])	52
Figura 4.8 - Pedacos de copos de plástico PET (polietileno tereftalato), antes do processo de fabrico (adaptado de [74])	53
Figura 4.9 - Coeficientes de absorção sonoros obtidos para a lã de poliéster pura e para a lã de poliéster obtida a partir da reciclagem de garrafas de plástico PET (polietileno tereftalato) (adaptado de [74])	54
Figura 4.10 - (a) Protótipo do painel <i>sandwich</i> testado na câmara reverberante; (b) cartão de favo de mel; (c) painel de fibras de celulose (adaptado de [77])	57
Figura 5.1 - Mapa da zona onde se encontra inserida a Escola Básica do 1.º Ciclo de Santiago de Candoso (Guimarães) (adaptado de [85])	62
Figura 5.2 - Envolvente da Escola Básica do 1.º Ciclo de Santiago de Candoso: (a) edifícios habitacionais a Norte; (b) edifícios habitacionais a Este	62
Figura 5.3 - Acessos da Escola Básica do 1.º Ciclo de Santiago de Candoso: (a) entrada pedonal pela Rua dos Vendedores; (b) portão de entrada pela Rua do Messouro	62
Figura 5.4 - Fachada principal da Escola Básica do 1.º Ciclo de Santiago de Candoso, orientada a Este (Nascente)	63
Figura 5.5 - Vista panorâmica da Escola Básica do 1.º Ciclo de Santiago de Candoso: (a) sala de aula disponibilizada; (b) construção a decorrer à frente da Escola Básica do 1.º Ciclo de Santiago de Candoso	63
Figura 5.6 - Copos plásticos de café em disposição quincôncio	66
Figura 5.7 - Copos plásticos de café em disposição quincôncio, furados com ferro de soldar (10 mm de diâmetro)	66
Figura 5.8 - Tabuleiros para ovos em celulose moldada com a face inversa exposta ao som	66
Figura 5.9 - Colchões de retomas compostos por 2 cm de espuma viscoelástica perfilada e 4 cm de espuma de alta resiliência	67
Figura 5.10 - Painel <i>NaturDecoTech</i> , presente na face interior da fachada principal da sala de aula analisada [87]	67
Figura 5.11 - Material de desperdício colocado na face interior da parede de fachada da sala de aula, sendo: (a) resíduo têxtil desperdiçado na reciclagem de pneus; (b) tela de solo em que se envolveu o resíduo têxtil para fixação à parede	68

Figura 5.12 - Equipamentos utilizados na medição do tempo de reverberação na câmara reverberante do Laboratório de Acústica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (LAfeup): (a) microfone; (b) fonte sonora; (c) sistema de aquisição de dados	69
Figura 5.13 - Planta esquemática da câmara reverberante do Laboratório de Acústica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (LAfeup), com a amostra (A), as duas posições das fontes sonoras (FSi e FSi') e as duas posições dos microfones (Mi e Mi') assinaladas	70
Figura 5.14 - Determinação da absorção sonora das amostras: (a) dos copos de café; (b) das espumas; (c) dos tabuleiros para ovos, na câmara reverberante do Laboratório de Acústica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (LAfeup)	70
Figura 5.15 - Equipamentos utilizados na medição do tempo de reverberação na sala de aula: (a) sonómetro; (b) fonte sonora	71
Figura 5.16 - Medição do tempo de reverberação na sala de aula, na situação de referência SV1 (sala de aula vazia, sem nenhum tipo de intervenção).....	72
Figura 5.17 - Planta esquemática da sala de aula, com a posição da fonte sonora (FS) e as diferentes posições medidas pelo sonómetro (T1, T2 e T3) assinaladas	72
Figura 5.18 - Planta esquemática da sala de aula, com as posições de medição do ruído de fundo no interior (RFi) e no exterior da sala (RFe) assinaladas	73
Figura 5.19 - Equipamentos utilizados na medição do RASTI (<i>rapid speech transmission index</i>) na sala de aula: (a) recetor; (b) emissor	74
Figura 5.20 - Medição do RASTI (<i>rapid speech transmission index</i>) na sala de aula, na situação de referência SV1 (sala de aula vazia, sem nenhum tipo de intervenção).....	74
Figura 5.21 - Planta esquemática da sala de aula, com a posição do emissor (E) e as diferentes posições do recetor do RASTI (1, 2, 3, 4, 5 e 6) assinaladas.....	75
Figura 5.22 - Esquema representativo da sala de aula com a amostra de material de desperdício (A) na posição a) (na parte superior das paredes do fundo da sala), o painel termoacústico (P) e o resíduo têxtil (RT) assinalados.....	76
Figura 5.23 - Esquema representativo da sala de aula com a amostra de material de desperdício (A) na posição b) (encostadas na longitudinal à base das paredes), o painel termoacústico (P) e o resíduo têxtil (RT) assinalados.....	76
Figura 5.24 - Esquema representativo da sala de aula com a amostra de material de desperdício (A) na posição c) (sobre o revestimento de piso), o painel termoacústico (P) e o resíduo têxtil (RT) assinalados	77
Figura 5.25 - Amostra dos copos de café furados na base (diâmetro de 10 mm) na sala de aula, na posição c) (sobre o revestimento de piso)	77
Figura 5.26 - Amostra dos tabuleiros para ovos na sala de aula, na posição b) (encostadas na longitudinal à base das paredes)	78
Figura 5.27 - Amostra das espumas na sala de aula, na posição a) (na parte superior das paredes do fundo), com 22 pessoas sentadas	78
Figura 5.28 - Esquema síntese de todos os ensaios realizados	79
Figura 6.1 - Coeficientes de absorção sonora (α_s) das amostras dos materiais de desperdício selecionados (CC - Copos de Café, CCf - Copos de Café furados na base (diâmetro de 10 mm), TO - Tabuleiros para Ovos, E - Espumas de colchões de retomas), em função da frequência.....	90

Figura 6.2 - Tempo de reverberação nas situações de referência SV1 (sala de aula vazia, sem nenhum tipo de intervenção) e SV2 (sala de aula vazia, com o painel termoacústico e um resíduo têxtil proveniente da reciclagem de pneus, aplicados na face interior da parede de fachada) da sala de aula, em função da frequência	91
Figura 6.3 - RASTI (<i>rapid speech transmission index</i>) nas situações de referência SV1 (sala de aula vazia, sem nenhum tipo de intervenção) e SV2 (sala de aula vazia, com o painel termoacústico e um resíduo têxtil proveniente da reciclagem de pneus, aplicados na face interior da parede de fachada), em função da distância ao emissor (E) de RASTI	92
Figura 6.4 - Ruído de fundo medido no interior (RFi) e no exterior (RFe) da sala de aula, na situação de referência SV1 (sala de aula vazia, sem nenhum tipo de intervenção), com e sem o filtro A	93
Figura 6.5 - Diminuição dos níveis de pressão sonora pela parede de fachada da sala de aula ($\Delta L = L_{ext} - L_{int}$)	94
Figura 6.6 - Valores do tempo de reverberação na situação de referência SV2 (sala de aula vazia, com o painel termoacústico e um resíduo têxtil proveniente da reciclagem de pneus, aplicados na face interior da parede de fachada), com a amostra dos copos de café furados na base (CCf) nas posições a) (na parte superior das paredes do fundo), b) (encostadas na longitudinal à base das paredes) e c) (sobre o revestimento de piso), em função da frequência	95
Figura 6.7 - Valores do tempo de reverberação na situação de referência SV2 (sala de aula vazia, com o painel termoacústico e um resíduo têxtil proveniente da reciclagem de pneus, aplicados na face interior da parede de fachada), com a amostra dos tabuleiros para ovos (TO) nas posições a) (na parte superior das paredes do fundo), b) (encostadas na longitudinal à base das paredes) e c) (sobre o revestimento de piso), em função da frequência	96
Figura 6.8 - Valores do tempo de reverberação na situação de referência SV2 (sala de aula vazia, com o painel termoacústico e um resíduo têxtil proveniente da reciclagem de pneus, aplicados na face interior da parede de fachada), com a amostra das espumas (E) nas posições a) (na parte superior das paredes do fundo), b) (encostadas na longitudinal à base das paredes), c) (sobre o revestimento de piso) e a) com 22 pessoas sentadas, em função da frequência	96
Figura 6.9 - RASTI (<i>rapid speech transmission index</i>) na situação de referência SV2 (sala de aula vazia, com o painel termoacústico e um resíduo têxtil proveniente da reciclagem de pneus, aplicados na face interior da parede de fachada) da sala de aula, para a amostra das espumas na posição a) (na parte superior das paredes do fundo), em função da distância ao emissor (E) de RASTI	97
Figura 6.10 - Esquema de todas as medições do RASTI (<i>rapid speech transmission index</i>) com os valores médios obtidos e a inteligibilidade previsível na sala de aula	98
Figura 6.11 - Valores do tempo de reverberação (T) de todos os ensaios realizados na sala de aula da Escola Básica do 1.º Ciclo de Santiago de Candoso (Guimarães), em função da frequência (Situação de referência SV1 - sala de aula vazia, sem nenhum tipo de intervenção; Situação de referência SV2 - sala de aula vazia, com o painel termoacústico e um resíduo têxtil proveniente da reciclagem de pneus, aplicados na face interior da parede de fachada; CCf - Copos de Café furados na base; TO - Tabuleiros para Ovos; E - Espumas; posição a) - placas de cartão pregadas na vertical na parte superior das paredes do fundo; posição b) - placas de cartão encostadas na longitudinal à base das paredes e posição c) - placas de cartão colocadas sobre o revestimento de piso).....	99
Figura 6.12 - RASTI (<i>rapid speech transmission index</i>) de todos os ensaios realizados na sala de aula da Escola Básica do 1.º Ciclo de Santiago de Candoso (Guimarães), em função da distância ao emissor (E) de RASTI (Situação de referência SV1 - sala de aula vazia, sem nenhum tipo de intervenção; Situação de referência SV2 - sala de aula vazia, com o painel termoacústico e um resíduo têxtil	

proveniente da reciclagem de pneus, aplicados na face interior da parede de fachada e posição a) - placas de cartão pregadas na vertical na parte superior das paredes do fundo).....	101
Figura A.1 - Colagem dos copos de café às placas de cartão com cola branca e colocação de tabuleiros para ovos a fazer pressão para facilitar a fixação.....	A.3
Figura A.2 - Colagem dos tabuleiros para ovos às placas de cartão com cola branca e colocação de uma mesa a fazer pressão para facilitar a fixação.....	A.3
Figura A.3 - Corte e colagem das espumas às placas de cartão com cola branca e colocação de uma mesa a fazer pressão para facilitar a fixação.....	A.3
Figura A.4 - Colagem dos copos para café com a colaboração dos estudantes do <i>Civil'in</i>	A.4
Figura A.5 - Transporte das amostras até à Escola Básica do 1.º Ciclo de Santiago de Candoso (Guimarães).....	A.4
Figura B.1 - Ensaios realizados na câmara reverberante do Laboratório de Acústica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (LAfeup)	B.3
Figura B.2 - Planta esquemática da câmara reverberante do Laboratório de Acústica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (LAfeup), com a amostra (A), as duas posições das fontes sonoras (FSi e FSj) e as duas posições dos microfones (Mi e Mj) assinaladas	B.4
Figura C.1 - Medição do ruído de fundo: (a) no interior da sala de aula; (b) no exterior da sala de aula	C.3
Figura C.2 - Planta esquemática da sala de aula, com as posições de medição do ruído de fundo no interior (RFi) e no exterior da sala (RFe) assinaladas	C.3
Figura C.3 - (a) Medição do tempo de reverberação na situação de referência SV1 (sala vazia, sem nenhum tipo de intervenção); (b) planta esquemática da sala de aula, com a posição da fonte sonora (FS) e as diferentes posições medidas pelo sonómetro (T1, T2 e T3) assinaladas.....	C.4
Figura C.4 - (a) Medição do RASTI (<i>rapid speech transmission index</i>) na situação de referência SV1 (sala vazia, sem nenhum tipo de intervenção); (b) planta esquemática da sala de aula, com a posição do emissor (E) e as diferentes posições do recetor do RASTI (1, 2, 3, 4, 5 e 6) assinaladas	C.5
Figura C.5 - (a) Medição do tempo de reverberação na situação de referência SV2 (sala de aula vazia, com o painel termoacústico e um resíduo têxtil proveniente da reciclagem de pneus, aplicados na face interior da parede de fachada); (b) planta esquemática da sala de aula, com a posição da fonte sonora (FS) e as diferentes posições medidas pelo sonómetro (T1, T2 e T3) assinaladas.....	C.6
Figura C.6 - (a) Medição do RASTI (<i>rapid speech transmission index</i>) na situação de referência SV2 (sala de aula vazia, com o painel termoacústico e um resíduo têxtil proveniente da reciclagem de pneus, aplicados na face interior da parede de fachada); (b) planta esquemática da sala de aula, com a posição do emissor (E) e as diferentes posições do recetor do RASTI (1, 2, 3, 4, 5 e 6) assinaladas	C.7
Figura C.7 - (a) Medição do tempo de reverberação com a amostra dos copos de café furados na base na posição a) (na parte superior das paredes do fundo); (b) planta esquemática da sala de aula, com a posição da fonte sonora (FS) e as diferentes posições medidas pelo sonómetro (T1, T2 e T3) assinaladas.....	C.8
Figura C.8 - Medição do tempo de reverberação com a amostra dos copos de café furados na base na posição b) (encostados na longitudinal à base das paredes); (b) planta esquemática da sala de aula, com a posição da fonte sonora (FS) e as diferentes posições medidas pelo sonómetro (T1, T2 e T3) assinaladas.....	C.9

Figura C.9 - Medição do tempo de reverberação com a amostra dos copos de café furados na base na posição c) (sobre o revestimento de piso); (b) planta esquemática da sala de aula, com a posição da fonte sonora (FS) e as diferentes posições medidas pelo sonómetro (T1, T2 e T3) assinaladasC.10

Figura C.10 - Medição do tempo de reverberação com a amostra dos tabuleiros para ovos na posição a) (na parte superior das paredes do fundo); (b) planta esquemática da sala de aula, com a posição da fonte sonora (FS) e as diferentes posições medidas pelo sonómetro (T1, T2 e T3) assinaladasC.11

Figura C.11 - Medição do tempo de reverberação com a amostra dos tabuleiros para ovos na posição b) (encostados na longitudinal à base das paredes); (b) planta esquemática da sala de aula, com a posição da fonte sonora (FS) e as diferentes posições medidas pelo sonómetro (T1, T2 e T3) assinaladasC.12

Figura C.12 - Medição do tempo de reverberação com a amostra dos tabuleiros para ovos na posição c) (sobre o revestimento de piso); (b) planta esquemática da sala de aula, com a posição da fonte sonora (FS) e as diferentes posições medidas pelo sonómetro (T1, T2 e T3) assinaladasC.13

Figura C.13 - Medição do tempo de reverberação com a amostra das espumas na posição a) (na parte superior das paredes do fundo); (b) planta esquemática da sala de aula, com a posição da fonte sonora (FS) e as diferentes posições medidas pelo sonómetro (T1, T2 e T3) assinaladasC.14

Figura C.14 - (a) Medição do RASTI (*rapid speech transmission index*) com a amostra das espumas na posição a) (na parte superior das paredes do fundo); (b) planta esquemática da sala de aula, com a posição do emissor (E) e as diferentes posições do recetor do RASTI (1, 2, 3, 4, 5 e 6) assinaladasC.15

Figura C.15 - Medição do tempo de reverberação com a amostra das espumas na posição b) (encostadas na longitudinal à base das paredes); (b) planta esquemática da sala de aula, com a posição da fonte sonora (FS) e as diferentes posições medidas pelo sonómetro (T1, T2 e T3) assinaladas C.16

Figura C.16 - Medição do tempo de reverberação com a amostra das espumas na posição c) (sobre o revestimento de piso); (b) planta esquemática da sala de aula, com a posição da fonte sonora (FS) e as diferentes posições medidas pelo sonómetro (T1, T2 e T3) assinaladasC.17

Figura C.17 - Medição do tempo de reverberação com a amostra das espumas na posição a) (na parte superior das paredes do fundo) com 22 pessoas sentadas; (b) planta esquemática da sala de aula, com a posição da fonte sonora (FS) e as diferentes posições medidas pelo sonómetro (T1, T2 e T3) assinaladasC.18

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 - Três gamas de frequências utilizadas em acústica de edifícios (adaptado de [4])	8
Quadro 2.2 - Bandas de frequência de 1/1 oitava e de 1/3 de oitava utilizadas em acústica de edifícios (adaptado de [4])	9
Quadro 2.3 - Valores numéricos das ponderações da curva A para bandas de frequência de 1/1 oitava e de 1/3 de oitava na gama audível [4]	10
Quadro 2.4 - Classificação de materiais absorventes sonoros de acordo com a norma EN ISO 11654 (adaptado de [15])	15
Quadro 2.5 - Valores ideais para o tempo de reverberação em função do tipo de utilização do espaço (adaptado de [4])	19
Quadro 2.6 - Curvas NC dos níveis de ruído de fundo máximos recomendados em função da utilização (adaptado de [23])	24
Quadro 2.7 - Variabilidade da emissão da voz entre vogais e consoantes (adaptado de [4])	26
Quadro 2.8 - Tabela de conversão do valor do RASTI (<i>rapid speech transmission index</i>) numa escala subjetiva de inteligibilidade da palavra (adaptado de [25])	26
Quadro 3.1 - Valor máximo do tempo de reverberação (T) segundo o RRAE, Portugal (adaptado de [30])	30
Quadro 3.2 - Valores máximos do nível de avaliação do ruído particular de equipamentos do edifício ($L_{Ar, nT}$) segundo o RRAE, Portugal (adaptado de [30])	30
Quadro 3.3 - Valores limite do nível sonoro contínuo equivalente do ruído de fundo para um período de 30 minutos ($L_{Aeq, 30min}$) e do tempo de reverberação (T) segundo o <i>BB93</i> , Reino Unido (adaptado de [33])	31
Quadro 3.4 - Valores limite recomendados do nível sonoro contínuo equivalente do ruído de fundo para um período de 60 minutos ($L_{Aeq, 60min}$) e do tempo de reverberação (T) segundo a ANSI/ASA S12.60/Part 1, Estados Unidos da América (adaptado de [38])	32
Quadro 3.5 - Valores máximos do tempo de reverberação (T) segundo o <i>DB-HR</i> , Espanha (adaptado de [43])	33
Quadro 3.6 - Objetivos de qualidade acústica aplicáveis para o ruído de fundo interior de edifícios de uso educacional segundo o <i>Real Decreto 1367/07</i> , Espanha (adaptado de [44])	33
Quadro 3.7 - Valores máximos do tempo de reverberação (T) segundo o <i>Arrêté du 25 avril</i> , França (adaptado de [46])	34
Quadro 3.8 - Valores máximos do nível de pressão sonora normalizada gerado pelos equipamentos do edifício (L_{nAT}) segundo o <i>Arrêté du 25 avril</i> , França (adaptado de [46])	34
Quadro 3.9 - Valores do tempo de reverberação (T) e do <i>speech transmission ratio</i> (STI) em salas destinadas à comunicação verbal segundo a PN-B-02151-4, Polónia (adaptado de [49] <i>apud</i> [47]) ..	34
Quadro 3.10 - Valores máximos do tempo de reverberação (T) e do nível sonoro percebido na sala quando as instalações operam simultaneamente ($L_{Aeq, nT, stat}$) segundo a NBN S 01-400-2, Bélgica (adaptado de [22] <i>apud</i> [51])	35

Quadro 3.11 - Valores limite superior para o tempo de reverberação (s), em edifícios de ensino, mobilados e desocupados, segundo a NS 8175, Noruega (adaptado de [55] <i>apud</i> [52])	36
Quadro 3.12 - Síntese dos valores limite do tempo de reverberação em salas de aula do ensino básico, para cada país referido ao longo deste capítulo	39
Quadro 3.13 - Valores dos tempos de reverberação máximos (s) de dois casos exemplo de salas de aula, de acordo com a legislação de cada país referido ao longo deste capítulo.....	40
Quadro 3.14 - Síntese dos valores ideais do tempo de reverberação em salas de aula, para cada estudo referido ao longo deste capítulo	40
Quadro 3.15 - Síntese dos valores limite do ruído de fundo em salas de aula do ensino básico, para cada país referido ao longo deste capítulo.....	41
Quadro 3.16 - Síntese dos valores ideais do ruído de fundo em salas de aula, para cada estudo referido ao longo deste capítulo.....	42
Quadro 4.1 - Número de estabelecimentos de ensino que ministram o 1.º ciclo do ensino básico, por ano letivo e por natureza do estabelecimento de ensino, em Portugal (adaptado de [68]).....	48
Quadro 4.2 - Valores dos coeficientes de absorção sonora (α_s) da lã de poliéster reciclada, obtidos através dos ensaios realizados em câmara reverberante (adaptado de [74])	53
Quadro 4.3 - Valores dos coeficientes de absorção sonora das amostras de espuma de poliuretano reciclada, obtidos através dos ensaios realizados em incidência normal (adaptado de [75])	54
Quadro 4.4 - Coeficientes de absorção sonora obtidos através dos ensaios em câmara reverberante (α_s) e coeficiente de absorção sonora ponderado (α_w) das amostras referidas (T - tabuleiro, C - caixa, A - com pequenas Aberturas, a - aberta, f - fechada, F - fruta, n - superfície normal exposta ao som, i - superfície inversa exposta ao som e P - plástico) (adaptado de [76])	55
Quadro 4.5 - Principais conclusões retiradas, comparáveis linha a linha (T - Tabuleiro, C - Caixa, A - com pequenas Aberturas, f - fechada, n - superfície normal exposta ao som e i - superfície inversa exposta ao som) (adaptado de [76]).....	56
Quadro 4.6 - Valores dos coeficientes de absorção sonora obtidos a partir do ensaio em câmara reverberante (α_s) do painel de <i>sandwich</i> , em função da frequência (adaptado de [77])	57
Quadro 4.7 - Composição das amostras de solas de sapatos recicladas e respetivo coeficiente de absorção sonora, em função da frequência (adaptado de [78])	58
Quadro 4.8 - Síntese dos valores dos coeficientes de absorção sonora correspondentes à melhor amostra de cada estudo de materiais de desperdício, referido no decorrer do capítulo 4	59
Quadro 4.9 - Valores dos coeficientes de absorção sonora ponderados (α_w) de placas de gesso cartonado laminado com perfurações (adaptado de [82]).....	60
Quadro 4.10 - Valores dos coeficientes de absorção sonora, em função da frequência, de painéis de lã mineral com acabamento em massa mineral de forma a obter uma superfície contínua (adaptado de [83]).....	60
Quadro 5.1 - Quadro síntese dos possíveis materiais de desperdício com potencial de absorção sonora	64
Quadro 6.1 - Tempo de reverberação (T) medido na câmara reverberante do Laboratório de Acústica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (LAfeup), em função da frequência, para a situação de referência (câmara reverberante vazia) e para as situações da câmara reverberante com	

as amostras dos copos de café (CC), dos copos de café com furos na base (CCf), dos tabuleiros para ovos (TO) e das espumas (E)	82
Quadro 6.2 - Coeficientes de absorção sonora (α_s), em função da frequência, das amostras dos copos de café (CC), dos copos de café com furos na base (CCf), dos tabuleiros para ovos (TO) e das espumas (E).....	83
Quadro 6.3 - NRC (<i>noise reduction coefficient</i>), coeficiente de absorção sonora ponderado (α_w) e classe de absorção sonora das amostras dos copos de café (CC), dos copos de café com furos na base (CCf), dos tabuleiros para ovos (TO) e das espumas (E)	83
Quadro 6.4 - Tempo de reverberação (T) medido na sala de aula, na situação de referência SV1 (sala de aula vazia, sem nenhum tipo de intervenção), em função da frequência.....	84
Quadro 6.5 - RASTI (<i>rapid speech transmission index</i>) medido na sala de aula, na situação de referência SV1 (sala de aula vazia, sem nenhum tipo de intervenção).....	85
Quadro 6.6 - Ruído de fundo medido no interior (RFi) e no exterior (RFe) da sala de aula, na situação de referência SV1 (sala de aula vazia, sem nenhum tipo de intervenção) e diminuição dos níveis de pressão sonora pela parede de fachada da sala de aula ($\Delta L = L_{ext} - L_{int}$)	85
Quadro 6.7 - Tempo de reverberação (T) medido na sala de aula, na situação de referência SV2 (sala de aula vazia, com o painel termoacústico e um resíduo têxtil proveniente da reciclagem de pneus, aplicados na face interior da parede de fachada), em função da frequência	86
Quadro 6.8 - RASTI (<i>rapid speech transmission index</i>) medido na sala de aula, na situação de referência SV2 (sala de aula vazia, com o painel termoacústico e um resíduo têxtil proveniente da reciclagem de pneus, aplicados na face interior da parede de fachada)	86
Quadro 6.9 - Tempo de reverberação (T) medido na sala de aula, para a amostra dos copos de café furados na base (CCf) nas posições a) (na parte superior das paredes do fundo), b) (encostadas na longitudinal à base das paredes) e c) (sobre o revestimento de piso), em função da frequência	87
Quadro 6.10 - Tempo de reverberação (T) médio nas frequências de 500, 1 000 e 2 000 Hz, para a amostra dos copos de café furados na base (CCf) nas posições a) (na parte superior das paredes do fundo), b) (encostadas na longitudinal à base das paredes) e c) (sobre o revestimento de piso)	87
Quadro 6.11 - Tempo de reverberação (T) medido na sala de aula, para a amostra dos tabuleiros para ovos (TO) nas posições a) (na parte superior das paredes do fundo), b) (encostadas na longitudinal à base das paredes) e c) (sobre o revestimento de piso), em função da frequência.....	88
Quadro 6.12 - Tempo de reverberação (T) médio nas frequências de 500, 1 000 e 2 000 Hz, para a amostra dos tabuleiros para ovos (TO) nas posições a) (na parte superior das paredes do fundo), b) (encostadas na longitudinal à base das paredes) e c) (sobre o revestimento de piso).....	88
Quadro 6.13 - Tempo de reverberação (T) medido na sala de aula, para a amostra das espumas (E) nas posições a) (na parte superior das paredes do fundo), b) (encostadas na longitudinal à base das paredes), c) (sobre o revestimento de piso) e a) com 22 pessoas sentadas, em função da frequência	89
Quadro 6.14 - Tempo de reverberação (T) médio nas frequências de 500, 1 000 e 2 000 Hz, para a amostra das espumas (E) nas posições a) (na parte superior das paredes do fundo), b) (encostadas na longitudinal à base das paredes), c) (sobre o revestimento de piso) e a) com 22 pessoas sentadas .	89
Quadro 6.15 - RASTI (<i>rapid speech transmission index</i>) medido na sala de aula, para a amostra das espumas (E) na posição a)	90

Quadro 6.16 - Valores do tempo de reverberação (T) médio nas frequências de 500, 1 000 e 2 000 Hz, para as situações de referência SV1 (sala de aula vazia, sem nenhum tipo de intervenção) e SV2 (sala de aula vazia, com o painel termoacústico e um resíduo têxtil proveniente da reciclagem de pneus, aplicados na face interior da parede de fachada) e limite regulamentar em Portugal	92
Quadro 6.17 - Valores médios da inteligibilidade da palavra na sala de aula, para as situações de referência SV1 (sala de aula vazia, sem nenhum tipo de intervenção) e SV2 (sala de aula vazia, com o painel termoacústico e um resíduo têxtil proveniente da reciclagem de pneus, aplicados na face interior da parede de fachada), e classificação da inteligibilidade de acordo com a escala subjetiva	93
Quadro 6.18 - Tempo de reverberação médio previsível (conforme fórmula de Sabine) na sala de aula, calculado em função dos resultados obtidos em câmara reverberante	100
Quadro 6.19 - Tempo de reverberação médio nas frequências de 500, 1 000 e 2 000 Hz obtido para todos os ensaios realizados na sala de aula	100
Quadro 6.20 - Área mínima a reabilitar nas situações de referência SV2 (sala de aula vazia, com o painel termoacústico e um resíduo têxtil proveniente da reciclagem de pneus, aplicados na face interior da parede de fachada) e SV1 (sala de aula vazia, sem nenhum tipo de intervenção), para diminuir o tempo de reverberação da sala de aula para o limite do RRAE ($T_{\text{médio}}(500 - 2k \text{ Hz}) = 0,83 \text{ s}$) e para o valor recomendado nesta dissertação ($T_{\text{médio}}(500 - 2k \text{ Hz}) = 0,6 \text{ s}$)	102
Quadro B.1 - Resultados do tempo de reverberação (T) medido na câmara reverberante, para a situação de referência (câmara vazia), para a câmara com os copos de café (CC), com os copos de café furados na base (CCf), com os tabuleiros para ovos (TO) e com as espumas (E), em função da frequência	B.4
Quadro C.1 - Resultados do ruído de fundo medido no interior (RFi) e no exterior (RFe) da sala de aula	C.3
Quadro C.2 - Resultados do tempo de reverberação na situação de referência SV1 (sala vazia, sem nenhum tipo de intervenção), para as duas leituras realizadas em cada posição do sonómetro (T1, T2 e T3), em função da frequência	C.4
Quadro C.3 - Resultados do RASTI (<i>rapid speech transmission index</i>) na situação de referência SV1 (sala vazia, sem nenhum tipo de intervenção), em função dos pontos de medição (1, 2, 3, 4, 5 e 6)	C.5
Quadro C.4 - Resultados do tempo de reverberação na situação de referência SV2 (sala de aula vazia, com o painel termoacústico e um resíduo têxtil proveniente da reciclagem de pneus, aplicados na face interior da parede de fachada), para as duas leituras realizadas em cada posição do sonómetro (T1, T2 e T3), em função da frequência	C.6
Quadro C.5 - Resultados do RASTI (<i>rapid speech transmission index</i>) na situação de referência SV2 (sala de aula vazia, com o painel termoacústico e um resíduo têxtil proveniente da reciclagem de pneus, aplicados na face interior da parede de fachada), em função dos pontos de medição (1, 2, 3, 4, 5 e 6)	C.7
Quadro C.6 - Resultados do tempo de reverberação com a amostra dos copos de café furados na base na posição a) (na parte superior das paredes do fundo), para as duas leituras realizadas em cada posição do sonómetro (T1, T2 e T3), em função da frequência	C.8
Quadro C.7 - Resultados do tempo de reverberação com a amostra dos copos de café furados na base na posição b) (encostados na longitudinal à base das paredes), para as duas leituras realizadas em cada posição do sonómetro (T1, T2 e T3), em função da frequência	C.9

Quadro C.8 - Resultados do tempo de reverberação com a amostra dos copos de café furados na base na posição c) (sobre o revestimento de piso), para as duas leituras realizadas em cada posição do sonómetro (T1, T2 e T3), em função da frequência.....	C.10
Quadro C.9 - Resultados do tempo de reverberação com a amostra dos tabuleiros para ovos na posição a) (na parte superior das paredes do fundo), para as duas leituras realizadas em cada posição do sonómetro (T1, T2 e T3), em função da frequência.....	C.11
Quadro C.10 - Resultados do tempo de reverberação com a amostra dos tabuleiros para ovos na posição b) (encostados na longitudinal à base das paredes), para as duas leituras realizadas em cada posição do sonómetro (T1, T2 e T3), em função da frequência	C.12
Quadro C.11 - Resultados do tempo de reverberação com a amostra dos tabuleiros para ovos na posição c) (sobre o revestimento de piso), para as duas leituras realizadas em cada posição do sonómetro (T1, T2 e T3), em função da frequência.....	C.13
Quadro C.12 - Resultados do tempo de reverberação com a amostra das espumas na posição a) (na parte superior das paredes do fundo), para as duas leituras realizadas em cada posição do sonómetro (T1, T2 e T3), em função da frequência.....	C.14
Quadro C.13 - Resultados do RASTI (<i>rapid speech transmission index</i>) com a amostra das espumas na posição a) (na parte superior das paredes do fundo), em função dos pontos de medição (1, 2, 3, 4, 5 e 6)	C.15
Quadro C.14 - Resultados do tempo de reverberação com a amostra das espumas na posição b) (encostadas na longitudinal à base das paredes), para as duas leituras realizadas em cada posição do sonómetro (T1, T2 e T3), em função da frequência.....	C.16
Quadro C.15 - Resultados do tempo de reverberação com a amostra das espumas na posição c) (sobre o revestimento de piso), para as duas leituras realizadas em cada posição do sonómetro (T1, T2 e T3), em função da frequência	C.17
Quadro C.16 - Resultados do tempo de reverberação com a amostra das espumas na posição a) (na parte superior das paredes do fundo) com 22 pessoas sentadas, para as duas leituras realizadas em cada posição do sonómetro (T1, T2 e T3), em função da frequência	C.18

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

A	(m ²)	Absorção sonora
AC	(-)	<i>Articulation class</i>
AI	(-)	<i>Articulation index</i>
A _j	(m ²)	Absorção sonora localizada
AL _{cons}	(-)	<i>Articulation loss of consonants</i>
c	(m/s)	Celeridade
C	(dB)	Claridade
D	(min)	Duração do ruído
d	(m)	Largura da caixa de ar
E	(cm)	Espessura da placa perfurada
E _{absorvida}	(J)	Energia absorvida
EDT	(s)	<i>Early decay time</i>
E _{incidente}	(J)	Energia incidente
f	(Hz)	Frequência
f ₁	(Hz)	Frequência limite inferior
f ₂	(Hz)	Frequência limite superior
I	(W/m ²)	Intensidade sonora
I ₀	(W/m ²)	Intensidade sonora de referência
l	(m)	Comprimento do gargalo/pescoço do ressoador de cavidade
L	(dB(A))	Valor global do nível sonoro ponderado com o filtro A
L ₅	(dB)	Nível de pressão sonora que num dado intervalo de tempo é excedido em 5% da duração temporal desse intervalo
L ₅₀	(dB)	Nível de pressão sonora que num dado intervalo de tempo é excedido em 50% da duração temporal desse intervalo
L ₉₅	(dB)	Nível de pressão sonora que num dado intervalo de tempo é excedido em 95% da duração temporal desse intervalo
L _A	(dB)	Valor global do nível sonoro ponderado com o filtro A
L _{Aeq,30min}	(dB)	Nível sonoro contínuo equivalente do ruído de fundo para um período de 30 minutos
L _{Aeq,60min}	(dB)	Nível sonoro contínuo equivalente do ruído de fundo para um período de 60 minutos
L _{Aeq,nT,stat}	(dB)	Nível sonoro contínuo equivalente percebido na sala quando as instalações operam simultaneamente
L _{Aeq}	(dB)	Nível sonoro contínuo equivalente ponderado com o filtro A
L _{Aeq(rf)}	(dB)	Nível sonoro contínuo equivalente do ruído de fundo ponderado com o filtro A
L _{Ar,nT}	(dB)	Nível de avaliação do ruído particular de equipamentos do edifício
L _d	(dB(A))	Indicador de ruído diurno
L _{den}	(dB(A))	Indicador de ruído diurno-entardecer-noturno
L _e	(dB(A))	Indicador de ruído ao entardecer
L _{eq}	(dB)	Nível de pressão sonora contínuo equivalente

L_I	(dB)	Nível de intensidade sonora
L_i	(dB)	Nível de pressão sonora no tempo t_i
L_n	(dB(A))	Indicador de ruído noturno
L_N	(dB)	Nível de pressão sonora estatístico
L_{nAT}	(dB)	Nível de pressão sonora normalizada gerado pelos equipamentos do edifício
$L_{p,A,T}$	(dB)	Nível de ruído de fundo médio
L_p	(dB)	Nível de pressão sonora
L_{soma}	(dB)	Nível de pressão sonora resultante
L_W	(dB)	Nível de potência sonora
m	(kg/m ²)	Massa superficial
m'	(m ⁻¹)	Absorção sonora do ar
N	(-)	Número de níveis de pressão sonora
NRC	(-)	<i>Noise reduction coefficient</i>
P	(%)	Porcentagem de área perfurada
p	(Pa)	Pressão sonora
p_0	(Pa)	Pressão sonora de referência
p_{at}	(Pa)	Pressão atmosférica normal
p_{ef}	(Pa)	Pressão eficaz ou RMS (<i>root mean square</i>)
P_{max}	(Pa)	Pressão sonora máxima da onda estacionária
P_{min}	(Pa)	Pressão sonora mínima da onda estacionária
Q	(-)	Coefficiente de direcionalidade da fonte sonora
R	(m ²)	Constante R do local
r	(m)	Raio
$RASTI$	(-)	<i>Rapid speech transmission index</i>
S	(m ²)	Área
S_i	(m ²)	Superfície real do material i
SIL	(-)	<i>Speech interference level</i>
STI	(-)	<i>Speech transmission index</i>
SWR	(-)	<i>Standing wave ratio</i>
T	(s)	Tempo de reverberação
TS	(s)	Tempo central
U_{50}	(-)	Rácio sonoro útil-prejudicial para 50 ms
V	(m ³)	Volume
W	(W)	Potência sonora
W_0	(W)	Potência sonora de referência
α	(-)	Coefficiente de absorção sonora
α_i	(-)	Coefficiente de absorção sonora do material i
α_s	(-)	Coefficiente de absorção sonora da amostra testada em câmara reverberante
α_w	(-)	Coefficiente de absorção sonora ponderado
$\theta(^{\circ}C)$	($^{\circ}C$)	Temperatura em graus Celsius

θ (K)	(K)	Temperatura em Kelvin
λ	(m)	Comprimento de onda
ρ	(kg/m ³)	Massa volúmica

ASA	<i>Acoustical Society of America</i>
AVAC	Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado
BB93	<i>Building Bulletin 93</i>
Centro Escolar	Programa Nacional de Requalificação da Rede do 1.º Ciclo do Ensino Básico e da Educação Pré-escolar
EUA	Estados Unidos da América
FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
HR	<i>High Resilience</i>
I	Incerteza (RRAE)
IGeFE	Instituto de Gestão Financeira da Educação
LAfeup	Laboratório de Acústica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
NBN	<i>Bureau voor Normalisatie</i> (Agência de normalização do governo belga)
NC	<i>Noise Criterion</i>
NR	<i>Noise Rating</i>
OMS	Organização Mundial de Saúde
PET	Polietileno tereftalato
PU	Poliuretano
PVC	Policloreto de vinilo
QREN	Quadro de Referência Estratégico Nacional
RGR	Regulamento Geral do Ruído
RRAE	Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios
TEK17	<i>Byggteknisk forskrift</i> (Regulamentos de Tecnologia de Construção)

1

INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO

Enquanto a Organização Mundial de Saúde (OMS) alerta que o ruído é a segunda maior causa ambiental de problemas de saúde, logo a seguir à qualidade do ar, também um estudo da Direção Geral do Ambiente concluiu que a exposição ao ruído na Europa contribui para cerca de 910 mil casos adicionais de hipertensão, 43 mil internações hospitalares por ano e pelo menos 10 mil mortes prematuras por ano relacionadas com a doença coronária e com o acidente vascular cerebral [1].

Compreende-se então, que o ruído excessivo pode prejudicar seriamente a saúde humana, reduzir a concentração, afetar o desempenho, provocar mudanças no comportamento e interferir nas atividades diárias das pessoas na escola, no trabalho, em casa, entre outros. Nesse sentido, a preocupação com a acústica deve estar presente, desde a fase de projeto, para permitir que o espaço se adeque perfeitamente ao seu propósito. Assim, e uma vez que o som na forma de discurso é o modo mais importante e mais simples de comunicação, o desempenho acústico de uma sala de aula assume um papel fundamental no desenvolvimento integral dos estudantes.

Aliando a melhoria do desempenho acústico à reutilização de materiais, que tem vindo a representar uma preocupação crescente da população, este estudo propõe a utilização de materiais de desperdício não orgânico, que revelem potencial neste domínio, em vez das tradicionais soluções de condicionamento acústico adotadas em Portugal.

A abordagem seguida assenta numa dissertação de investigação e projeto, que mais do que avaliar qualitativamente o desempenho acústico de uma sala de aula de uma escola antes e após intervenção, caracteriza e consolida o conhecimento relativo a três casos de materiais de desperdício não orgânico com diferentes propriedades acústicas.

1.2. ÂMBITO E OBJETIVOS

A avaliação deste trabalho centra-se na análise do tempo de reverberação e da inteligibilidade da palavra numa sala de aula de uma escola antes e após intervenção com materiais de desperdício não orgânico.

Assim, nesta dissertação definiram-se os seguintes objetivos principais:

- Avaliar qualitativamente a influência dos materiais de desperdício não orgânico implementados, na melhoria do desempenho acústico da sala de aula;
- Contribuir para a definição de propriedades acústicas dos materiais de desperdício selecionados, particularmente do coeficiente de absorção sonora, através de ensaios realizados em câmara reverberante;

- Especificar valores recomendados para os parâmetros acústicos mais relevantes do ponto de vista da correção acústica em salas de aulas do 1.º ciclo do ensino básico.

A materialização dos objetivos principais exigiu a concretização dos seguintes objetivos complementares:

- Interpretar a legislação e normalização em diferentes países, indicar os limites definidos para os parâmetros relevantes no âmbito da presente dissertação e compará-los com a regulamentação portuguesa;
- Estudar os valores ideais referidos por diferentes autores para os parâmetros relevantes no âmbito da presente dissertação e compará-los com os limites definidos nas legislações e normalizações estudadas;
- Refletir sobre as potencialidades acústicas de diversas possibilidades de materiais de desperdício não orgânico;
- Compreender a metodologia, conhecer os equipamentos e estudar as recomendações das normas seguidas para a realização dos ensaios laboratoriais e *in situ* e para a respetiva avaliação dos resultados obtidos;
- Entender a estruturação do parque escolar português, especialmente no que diz respeito às condições acústicas das escolas do 1.º ciclo do ensino básico e conhecer as soluções de condicionamento acústico tradicionalmente aplicadas em Portugal.

1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação divide-se em sete capítulos:

- O capítulo 1 enquadra a importância do tema estudado, resume os objetivos do trabalho e apresenta a organização da dissertação;
- O capítulo 2 corresponde à apresentação e caracterização dos conceitos acústicos que se consideram essenciais para a compreensão deste trabalho. Define ainda o tempo de reverberação, o ruído de fundo e o RASTI como os principais parâmetros a ter em consideração no estudo do desempenho acústico de salas de aula;
- O capítulo 3 sistematiza um conjunto de valores limite do tempo de reverberação, ruído de fundo e RASTI presentes em legislações e normalizações de uma amostra de diversos países, indica os valores ideais citados em alguns estudos e conclui quais os valores recomendados para a obtenção de um desempenho acústico adequado em salas de aula do 1.º ciclo do ensino básico;
- O capítulo 4 descreve a tipologia das escolas portuguesas do 1.º ciclo do ensino básico, estuda as soluções tipicamente utilizadas na reabilitação de salas de aula em Portugal e investiga as propriedades acústicas de diferentes materiais de desperdício bem como a possibilidade da sua utilização como soluções económicas e competitivas face às soluções utilizadas tradicionalmente para a reabilitação acústica em Portugal;
- O capítulo 5 caracteriza a Escola Básica do 1.º Ciclo de Santiago de Candoso (Guimarães) onde se encontra a sala de aula estudada nesta dissertação, expõe os materiais de desperdício selecionados para os ensaios, refere os motivos para a sua escolha e descreve a metodologia adotada e os equipamentos utilizados nas medições realizadas na câmara reverberante e na sala de aula;

- O capítulo 6 engloba a apresentação e análise dos resultados obtidos nos ensaios realizados na câmara reverberante e na sala de aula. Inclui ainda a comparação dos resultados obtidos na câmara reverberante e na sala de aula, a comparação dos resultados antes e após a intervenção, a verificação do cumprimento/incumprimento dos limites regulamentares portugueses e uma estimativa da quantidade de área mínima de amostras de materiais de desperdício necessária para diminuir o tempo de reverberação da sala para o limite regulamentar português e para o valor recomendado por esta dissertação;
- O capítulo 7 resume as principais conclusões e perspectivas de desenvolvimento nos futuros trabalhos de investigação.

2

CONCEITOS ACÚSTICOS

2.1. INTRODUÇÃO

No presente capítulo, faz-se uma apresentação dos principais conceitos acústicos cuja compreensão é essencial para a leitura deste trabalho. Começa-se pelos conceitos de base relativamente ao som, ao ruído e à acústica de edifícios, até aos principais parâmetros envolvidos na caracterização do desempenho acústico de uma sala de aula, como a absorção sonora, o tempo de reverberação, as fontes de ruído e a inteligibilidade da palavra.

Deste modo, os conceitos teóricos definidos de uma forma simples e objetiva, com apresentação de fórmulas quando necessário, vão apoiar os capítulos seguintes, essencialmente no que diz respeito às medições e avaliações expostas no estudo de caso da presente dissertação.

2.2. SOM E RUÍDO

O som pode ser visto como um estímulo ou como uma sensação auditiva. O estímulo refere-se ao movimento de uma onda sonora no ar ou noutros meios elásticos, enquanto que a sensação auditiva corresponde ao impulso provocado no cérebro, devido à excitação do sistema auditivo [2].

O ser humano comunica através de sons, utiliza máquinas que produzem sons, meios de transporte que emitem sons, entre outros. O som é, portanto, essencial para o seu dia-a-dia. Todavia, como poluente, este pode possuir um papel de muito incómodo no quotidiano de cada indivíduo [3]. Por este motivo, a salvaguarda da saúde humana e o bem-estar das populações, no que diz respeito à prevenção do ruído e ao controlo da poluição sonora, têm vindo a ser assumidos em termos legislativos.

A distinção entre som e ruído é subjetiva, estando o som associado a sensações auditivas agradáveis ou com significado para o ouvinte e o ruído associado a sensações desagradáveis, incómodas ou sem significado para o ouvinte [3, 4].

Usualmente, é no interior dos edifícios, sejam eles de habitação, comércio ou serviços, que se desenrolam a maior parte das atividades do quotidiano do ser humano e é nesses locais que se considera, por norma, mais incomodativo o ruído. A afetação da audição, a perda de concentração, a perturbação do sono, a interferência na comunicação oral, o cansaço e a irritação são alguns dos possíveis efeitos do ruído sobre o Homem [5].

2.3. ACÚSTICA

A acústica é uma ciência complexa que, hoje em dia, se pode dividir nas mais diversas áreas (a acústica de edifícios, a acústica musical, bioacústica, eletroacústica, entre outras). É o ramo da física que estuda

as ondas sonoras e não existiria se o ser humano não possuísse um sistema auditivo que lhe permitisse captar variações de pressão que se propagam no ar ou noutro meio elástico [4].

Entre os diferentes ramos da acústica, a de edifícios é a que se preocupa com a localização, a construção e a organização dos edifícios, de modo a proporcionar condições de conforto acústico adequadas ao exercício das atividades a que estes se dedicam [6].

Com a crescente consciencialização para a reabilitação de edifícios há a necessidade de melhorar o desempenho acústico em função das limitações que a arquitetura impõe. No entanto, essa realidade é mais complexa do que adequar o projeto arquitetónico aos requisitos acústicos do espaço, e como tal, deveria acontecer com menor regularidade no setor da construção civil.

Em suma, é notório que “quer estejamos a ouvir sons que nos dão prazer ou sons que nos alertam para o perigo, sejam eles sons da natureza, ou sons da tecnologia, as propriedades da acústica e a forma como os espaços arquitetónicos afetam esses sons é sentida em cada momento das nossas vidas. A acústica é importante? Pode crer que sim.” [2].

2.4. PRESSÃO SONORA

A pressão sonora, medida em *pascal* (Pa), serve de base ao estudo dos sons e corresponde à variação da pressão provocada pela propagação de ondas sonoras, adotando como referência a pressão atmosférica normal (p_{at}) [6].

A pressão sonora traduz-se na diferença entre a pressão instantânea do ar, na presença de ondas sonoras, e a pressão atmosférica normal, que no nosso planeta apresenta o valor aproximado de 101 400 Pa ($\cong 10^5$ Pa). Esta variação muito pequena em torno da pressão atmosférica é o que os ouvidos conseguem captar (figura 2.1) [4].

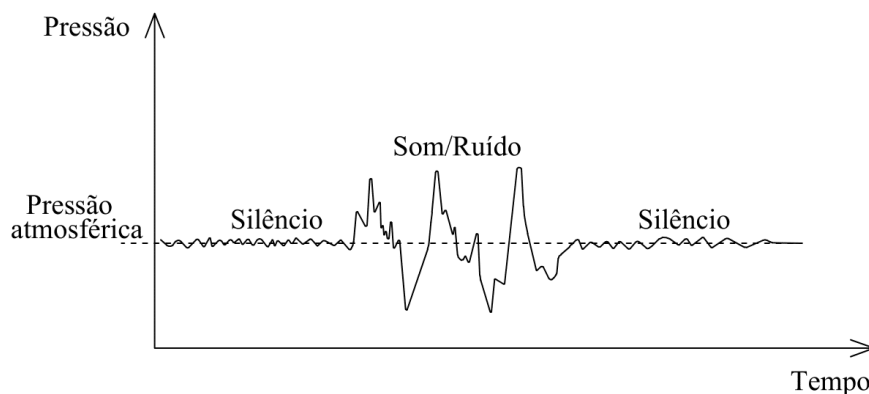


Figura 2.1 - Variação de pressão produzida por uma fonte sonora, som ou ruído (adaptado de [7])

O limiar da audição corresponde à variação de pressão mínima que um ser humano jovem ouve e corresponde sensivelmente a 10^{-5} Pa. Em oposição, o limiar da dor corresponde ao valor máximo a partir do qual a sensação auditiva passa de ruído a dor e verifica-se para uma variação de pressão de cerca de 100 Pa [4].

A escala utilizada para a medição da pressão sonora, em detrimento da escala linear em *pascal*, é o *decibel* (dB) pois esta aproxima-se mais da resposta, quase logarítmica, do ouvido aos estímulos e, como tal, conduz a números menos dispersos e de uso mais prático. Por definição, o *decibel* (dB) é igual a 0,1 *bel* [4, 8].

A equação (2.1) é utilizada para converter pressões, p , em níveis de pressão sonora, L_p .

$$L_p = 20 \log \frac{p}{p_0} \quad (2.1)$$

Da mesma forma, o nível de pressão sonora pode também ser calculado com recurso à equação (2.2).

$$L_p = 10 \log \frac{p^2}{p_0^2} \quad (2.2)$$

Sendo:

- L_p - nível de pressão sonora (dB);
- p - pressão sonora (Pa);
- p_0 - pressão sonora de referência (2×10^{-5} Pa).

A pressão sonora é medida por sonómetros, que são equipamentos que avaliam a pressão eficaz ou RMS (*root mean square*). É de salientar que os sonómetros são os aparelhos mais utilizados em medições acústicas, e como tal existe interesse em definir a pressão eficaz (p_{ef}) [9].

A equação (2.3) define o quadrado do valor eficaz da pressão sonora, para um determinado intervalo de tempo t , definido por $(t_2 - t_1)$ [5].

$$p_{ef}^2 = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} p^2(t) dt \quad (2.3)$$

Para adicionar níveis de pressão sonora aplicam-se as regras de adição de logaritmos. O nível de pressão sonora resultante (L_{soma}) de dois níveis idênticos encontra-se enunciado na equação (2.4).

$$L_{soma} = 10 \log \left(\frac{p^2}{p_0^2} + \frac{p^2}{p_0^2} \right) = 10 \log \left(2 \frac{p^2}{p_0^2} \right) = 10 \log(2) + 10 \log \left(\frac{p^2}{p_0^2} \right) = 3 + L \text{ (dB)} \quad (2.4)$$

Se os níveis de pressão sonora forem diferentes e de número N utiliza-se a equação (2.5) para determinar o L_{soma} .

$$L_{soma} = 10 \log \sum_{i=1}^N 10^{\frac{L_i}{10}} \text{ (dB)} \quad (2.5)$$

2.5. FREQUÊNCIA

A frequência (f) é uma das características mais importantes de um sinal sonoro, mede-se em *hertz* (Hz) e representa o número de ciclos completos, por segundo, de uma onda sonora. Um som composto por uma frequência é um som puro e sons que resultam da sobreposição de vários sons puros, denominam-se sons complexos [4].

O sistema auditivo humano tem uma sensibilidade auditiva variável em função da frequência (para frequências muito baixas e/ou muito elevadas a sensibilidade auditiva diminui consideravelmente) [4, 10, 11]. Nesse sentido, a figura 2.2 apresenta a gama de sons audíveis nos humanos, que é limitada inferiormente pelo limiar da audição e superiormente pelo limiar da dor.

É também possível observar na figura 2.2 as frequências que têm mais influência na zona central, onde se encontram os sons mais habituais (música e ruídos diversos) e no núcleo mais interior, onde se encontra o domínio fundamental da palavra [4].

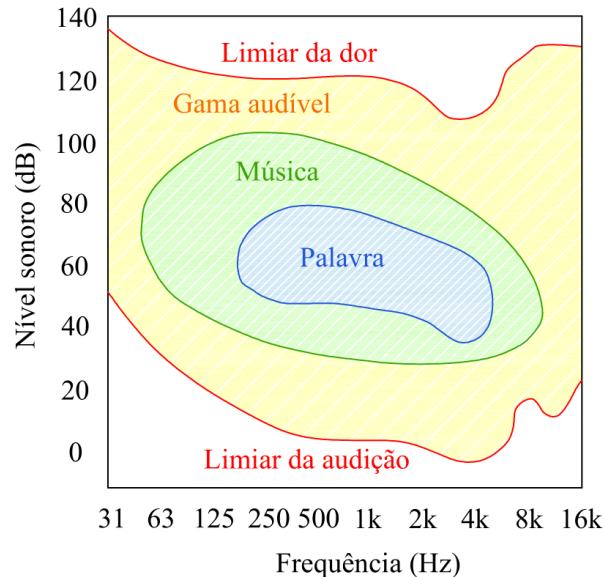


Figura 2.2 - Variação em frequência da gama audível (adaptado de [7])

Em acústica de edifícios é normal distinguirem-se três gamas de frequências, que se apresentam no quadro 2.1.

Quadro 2.1 - Três gamas de frequências utilizadas em acústica de edifícios (adaptado de [4])

Gama de frequência	Faixa (Hz)
Graves	20 a 355
Médias	355 a 1 410
Agudas	1 410 a 20 000

Dado que existem inúmeras frequências que tornam a análise acústica muito complexa, agruparam-se as frequências por “bandas” de forma a simplificar o seu estudo. Cada banda tem uma frequência limite inferior (f_1) e superior (f_2), e cuja diferença define a largura da banda. Em acústica de edifícios utilizam-se as de 1/1 oitava e de 1/3 de oitava, que têm uma relação entre o limite superior e o limite inferior de 2 e de $2^{1/3}$, respetivamente [5].

No quadro 2.2 apresentam-se as bandas de frequência de 1/1 oitava e de 1/3 de oitava, que são as mais utilizadas em acústica de edifícios. Cada banda de 1/1 oitava corresponde à soma de três bandas de 1/3 de oitava, como se pode visualizar pela figura 2.3, logo os níveis de pressão sonora da banda de 1/1 oitava são sempre maiores do que os correspondentes níveis da banda de 1/3 de oitava [11].

Quadro 2.2 - Bandas de frequência de 1/1 oitava e de 1/3 de oitava utilizadas em acústica de edifícios (adaptado de [4])

Bandas	Frequência (Hz)																	
1/1 oitava	125	250	500	1 000	2 000	4 000												
1/3 oitava	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1 000	1 250	1 600	2 000	2 500	3 150	4 000	5 000

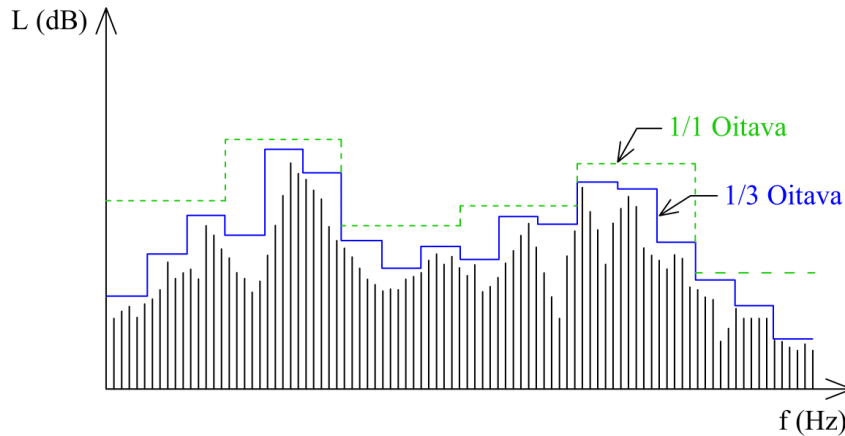


Figura 2.3 - Exemplo de espectros sonoros de um mesmo ruído em bandas de 1/1 oitava e de 1/3 de oitava (adaptado de [4])

Uma vez que o ouvido humano dá menor ou maior importância ao som consoante a sua frequência, são utilizadas as curvas de ponderação A, B, C e D para corrigir a interpretação que este faz do ruído (figura 2.4) [7]. A curva/filtro A é a mais utilizada pois aproxima à resposta humana os ruídos de fraca intensidade, enquanto que as curvas B e C são semelhantes à curva A, mas para ruídos mais intensos e a curva D utiliza-se especialmente com ruídos de aviões [4].

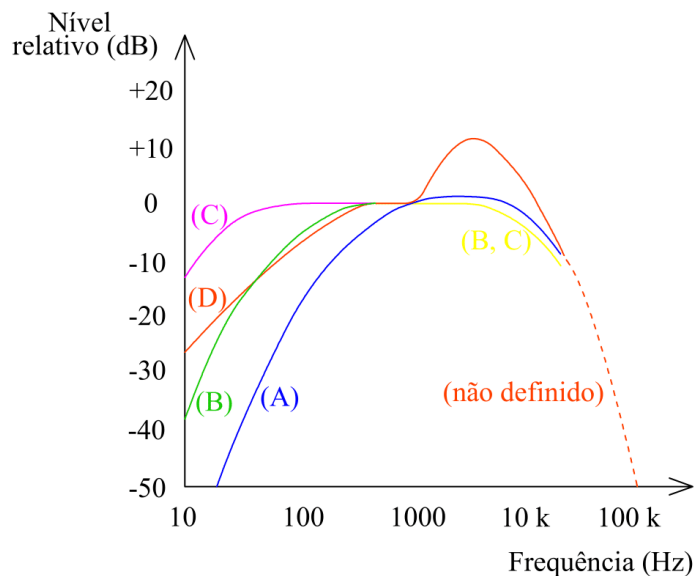


Figura 2.4 - Descrição das curvas de ponderação A, B, C e D (adaptado de [12])

No quadro 2.3 indicam-se as ponderações da curva A para bandas de frequência de 1/1 oitava e de 1/3 de oitava.

Quadro 2.3 - Valores numéricos das ponderações da curva A para bandas de frequência de 1/1 oitava e de 1/3 de oitava na gama audível [4]

Banda de frequência (Hz)	Ponderação A 1/3 oitava	Ponderação A 1/1 oitava	Banda de frequência (Hz)	Ponderação A 1/3 oitava	Ponderação A 1/1 oitava
25	-44,7		800	-0,8	
31	-39,4	-40	1 000	0	0
40	-34,6		1 250	0,6	
50	-30,2		1 600	1,0	
63	-26,2	-26	2 000	1,2	+1
80	-22,5		2 500	1,3	
100	-19,1		3 150	1,2	
125	-16,1	-15,5	4 000	1,0	+1
160	-13,4		5 000	0,5	
200	-10,9		6 300	-0,1	
250	-8,6	-8,5	8 000	-1,1	-1
315	-6,6		10 000	-2,5	
400	-4,8		12 500	-4,3	
500	-3,2	-3	16 000	-6,6	-7
630	-1,9		20 000	-9,3	

Fazendo a soma logarítmica dos níveis de pressão sonora medidos com a correção do filtro A, pode-se representar um som através de um valor global do nível sonoro, L_A em dB ou L em dB(A) [4].

2.6. TEMPO

Devido à generalizada instabilidade na duração dos níveis de pressão sonora dos ruídos, é fundamental recorrer a parâmetros em que o fator tempo intervém na descrição do fenómeno sonoro [4].

O método mais simples para determinar a pressão sonora média num longo período é o nível de pressão sonora contínuo equivalente (parâmetro energético), equação (2.6) [4, 11].

$$L_{eq} = 10 \log \frac{1}{D} \int_0^D \left(\frac{p(t)}{p_0} \right)^2 dt \quad (2.6)$$

Sendo:

L_{eq} - nível de pressão sonora contínuo equivalente (dB);

p - pressão sonora (Pa);

p_0 - pressão sonora de referência (2×10^{-5} Pa);

D - duração do ruído.

De forma análoga, o nível de pressão sonora contínuo equivalente também pode ser calculado pela equação (2.7) a partir de uma distribuição de níveis sonoros associada a uma ponderação que reflete a duração relativa de cada nível [5, 13].

$$L_{eq} = 10 \log \left[\left(\frac{1}{D} \right) \sum_{i=1}^N t_i 10^{\frac{L_i}{10}} \right] \quad (2.7)$$

Sendo:

L_{eq} - nível de pressão sonora contínuo equivalente (dB);

L_i - nível de pressão sonora no tempo t_i (dB);

D - duração do ruído.

Também é possível obter o nível sonoro contínuo equivalente ponderado A (L_{Aeq}) fazendo a correção dos níveis de pressão sonora com o filtro A, como se demonstra na equação (2.8) [8].

$$L_{Aeq} = 10 \log \left[\left(\frac{1}{D} \right) \int_0^D 10^{\frac{L_A(t)}{10}} dt \right] \quad (2.8)$$

O nível de pressão sonora contínuo equivalente (L_{eq}) em conjunto com o nível de pressão sonora estatístico (L_N), são os dois parâmetros de medição de ruído mais utilizados no domínio do tempo.

O nível de pressão sonora estatístico corresponde ao nível que num dado intervalo de tempo é excedido em N% da duração temporal desse intervalo, sendo os descritores que se utilizam com mais frequência o L_{50} , que corresponde à mediana, e o L_{95} [4].

2.7. INTENSIDADE E POTÊNCIA SONORA

A intensidade sonora (I), ao contrário da pressão sonora que é uma grandeza escalar, corresponde a uma medida vetorial definida como a quantidade média de energia, numa dada direção, que atravessa, por segundo, uma área de 1 m^2 , normal a essa direção [4].

A potência sonora (W) é uma característica exclusiva da fonte, contrariamente ao nível de pressão sonora que sofre influência do meio onde se encontra devido à introdução de absorção e reflexão [14].

A relação entre a intensidade, a potência e a pressão sonora pode ser expressa pela equação (2.9) [4].

$$I = \frac{W}{4\pi r^2} = \frac{p^2}{\rho c} \quad (2.9)$$

Sendo:

I - intensidade sonora (W/m^2);

W - potência sonora (W);

r - raio (m);

p - pressão sonora (Pa);

ρ - massa volúmica (ar $\cong 1,2 \text{ kg/m}^3$);

c - celeridade ($\cong 340 \text{ m/s}$).

O cálculo da celeridade ou velocidade de propagação das ondas sonoras na atmosfera depende da temperatura do meio de acordo com a expressão (2.10) [4].

$$c = 20,045 \sqrt{\theta(K)}, \text{ com } \theta(K) = 273,15 + \theta(^{\circ}C) \quad (2.10)$$

É comum caracterizar-se um fenômeno sonoro através dos seus níveis de intensidade e potência sonora, dados pelas equações (2.11) e (2.12) [4].

$$L_I = 10 \log \frac{I}{I_0} \quad (2.11)$$

$$L_W = 10 \log \frac{W}{W_0} \quad (2.12)$$

Sendo:

- L_I - nível de intensidade sonora (dB);
- I - intensidade sonora (W/m^2);
- I_0 - intensidade sonora de referência ($10^{-12} W/m^2$);
- L_W - nível de potência sonora (dB);
- W - potência sonora (W);
- W_0 - potência sonora de referência ($10^{-12} W$).

2.8. RUÍDOS BRANCO E ROSA

Existem dois modelos de ruído-tipo na acústica de edifícios, os ruídos branco e rosa. Um ruído branco é definido por um espectro com valor de nível de pressão sonora constante no domínio da frequência, enquanto que um ruído rosa é representado por um espectro em que o valor do nível de pressão sonora decresce 3 dB/oitava, isto se a análise for linear. Caso a escala utilizada no eixo das frequências seja logarítmica, então no caso do ruído branco, o valor dos níveis de pressão sonora crescerá 3 dB/oitava e no ruído rosa este valor manter-se-á constante [4, 5]. As figuras 2.5 e 2.6 representam, respectivamente, os dois modelos de ruído branco e rosa, para o eixo das abcissas em escala linear e logarítmica.

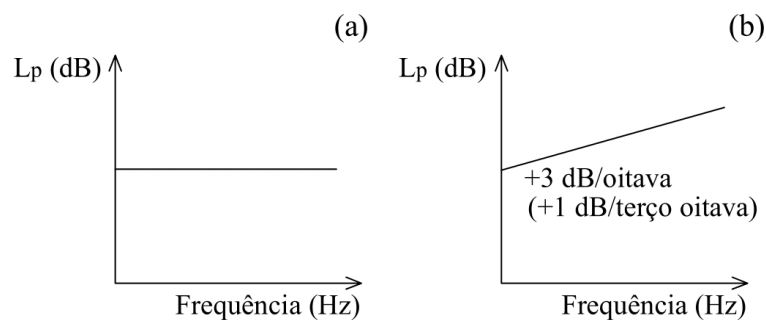


Figura 2.5 - Modelo de ruído branco com as abcissas em escala: (a) linear; (b) logarítmica (adaptado de [5])

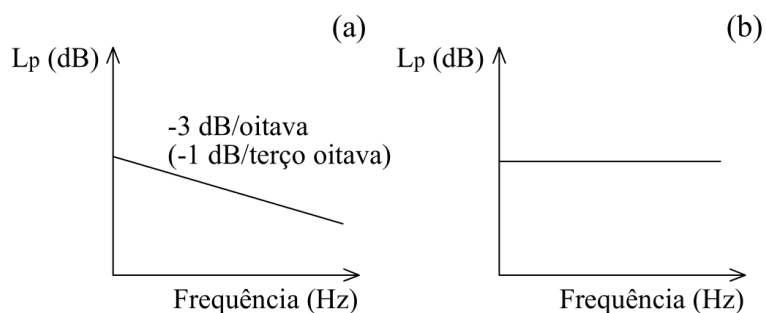


Figura 2.6 - Modelo de ruído rosa com as abcissas em escala: (a) linear; (b) logarítmica (adaptado de [5])

2.9. CORREÇÃO ACÚSTICA E ISOLAMENTO SONORO

A acústica de edifícios estuda fundamentalmente dois conceitos distintos que correspondem à “correção acústica” e ao “isolamento sonoro”.

Quando se pretende tratar acusticamente um espaço fechado para que os sons aí emitidos não sejam recebidos em locais contíguos e/ou vice-versa (exemplo: o caso das discotecas que produzem ruído audível nas habitações próximas) está em causa o isolamento sonoro desse espaço [4].

Pelo contrário, a correção acústica tem como objetivo tratar um espaço para o som aí emitido (exemplos: salas de aula, auditórios e salas de concerto). Neste caso, devem criar-se condições de absorção sonora ou de difusão acústica em função do objetivo pretendido. Como tal, a forma de atuação passará por aumentar ou diminuir a absorção sonora das superfícies interiores do espaço intervencionado ou variar o volume da divisão [4].

2.10. ABSORÇÃO SONORA

A absorção sonora (A) é a dissipação de energia sonora quando esta incide numa determinada superfície exposta à incidência do som. Varia conforme a natureza das superfícies, o ângulo de incidência das ondas sonoras nas mesmas e a frequência do som incidente [15].

Denomina-se coeficiente de absorção sonora (α) a razão entre a energia sonora que é absorvida e a energia sonora incidente num determinado material, equação (2.13) [4].

$$\alpha = \frac{E_{\text{absorvida}}}{E_{\text{incidente}}} \quad (2.13)$$

O α utiliza-se para avaliar a eficiência de uma superfície ou material na absorção do som. Varia entre 0 e 1, logo um material muito refletor apresenta uma absorção sonora quase nula, enquanto que um material absorvente perfeito absorve 100% do som incidente, o que corresponde a um coeficiente de absorção sonora de 1 [4]. Na figura 2.7 apresenta-se, entre outros, o mecanismo da absorção.

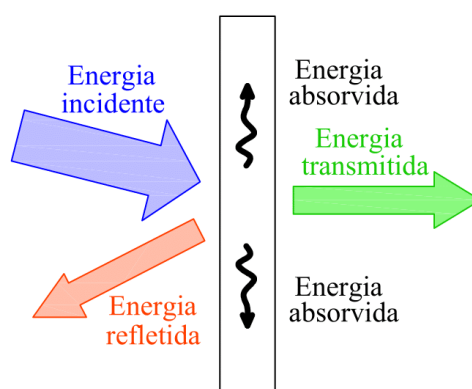


Figura 2.7 - Mecanismo da absorção, transmissão e reflexão sonora

É possível caracterizar a absorção sonora de uma área particular de material, multiplicando o seu coeficiente de absorção sonora pela superfície do material exposta ao som, expressão (2.14) [2].

$$\sum A = S_1\alpha_1 + S_2\alpha_2 + S_3\alpha_3 + \dots \quad (2.14)$$

Sendo:

S_1, S_2, S_3, \dots - áreas das superfícies expostas (m^2);

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots$ - coeficientes de absorção sonora das respectivas áreas (adimensional).

Apesar dos coeficientes de absorção sonora variarem com a frequência, são habitualmente utilizados valores únicos para caracterizar os coeficientes de absorção sonora dos materiais, conhecidos como NRC (*noise reduction coefficient*) ou coeficiente de absorção sonora ponderado (α_w) [4].

O NRC (usado especialmente nos EUA e Canadá) é a média aritmética dos valores dos coeficientes de absorção sonora nas frequências 250, 500, 1 000 e 2 000 Hz, conforme a equação (2.15), e deve apresentar-se arredondado para o múltiplo mais próximo de 0,05 [4].

$$\text{NRC} = (\alpha_{250} + \alpha_{500} + \alpha_{1000} + \alpha_{2000})/4 \quad (2.15)$$

Uma vez que o NRC é um valor médio dos coeficientes de absorção sonora correspondentes a frequências médias, considera-se importante referir que este será um parâmetro útil em aplicações que privilegiem o discurso oral [2].

Também é relevante entender que o efeito máximo conseguido através da colocação de materiais absorventes nas paredes não tem a capacidade de reduzir o ruído proveniente da fonte mas sim o objetivo de evitar o ruído refletido (o que, na melhor das hipóteses, é equivalente a não ter paredes) [16].

O coeficiente de absorção sonora ponderado (α_w), conforme a norma EN ISO 11654 [17], obtém-se a partir da curva característica dos fatores de absorção sonora, usando as bandas de 1/1 oitava dos 250 aos 4 000 Hz, por ajuste ponderado a uma curva de referência, indicada na figura 2.8. O α_w é o valor lido para a frequência central de 500 Hz na curva ajustada, de modo a que, a soma dos desvios positivos seja a mais elevada possível sem ultrapassar os 0,10 (em múltiplos de 0,05) [4, 15].

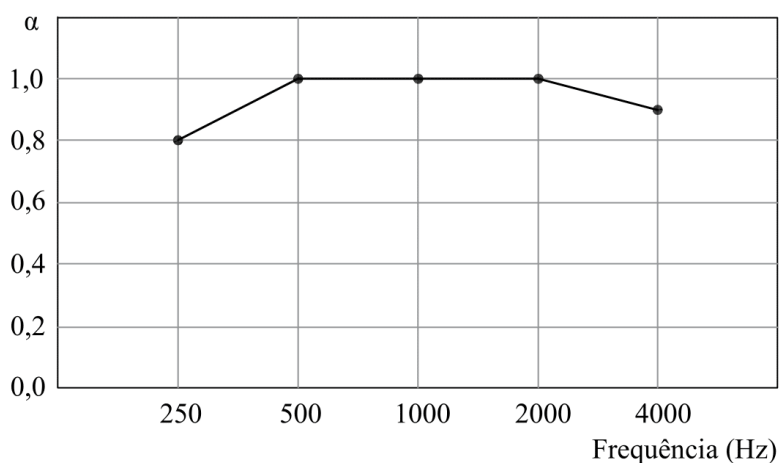


Figura 2.8 - Curva de referência para determinação do coeficiente de absorção sonora ponderado (adaptado de [15])

Caso os coeficientes de absorção sonora medidos excedam a curva de referência em 0,25 ou mais, acrescenta-se ao α_w a indicação de um indicador de forma L, M ou H entre parêntesis, consoante aconteça nos 250 - 500, 1 000 - 2 000 ou 4 000, respetivamente [4].

A norma EN ISO 11654 [17] também refere a atribuição de classes de absorção sonora tal como se apresentam no quadro 2.4.

Quadro 2.4 - Classificação de materiais absorventes sonoros de acordo com a norma EN ISO 11654 (adaptado de [15])

Classe de absorção sonora	α_w
A	$\alpha_w \geq 0,90$
B	$0,80 \leq \alpha_w \leq 0,85$
C	$0,60 \leq \alpha_w \leq 0,75$
D	$0,30 \leq \alpha_w \leq 0,55$
E	$0,15 \leq \alpha_w \leq 0,25$
Não classificado	$\alpha_w \leq 0,10$

Interessa referir dois métodos de determinação do coeficiente de absorção sonora, o método do tubo de ondas estacionárias (ou tubo de Kundt) e o método da câmara reverberante.

O método do tubo de ondas estacionárias permite a determinação do coeficiente de absorção de materiais absorventes a partir de amostras de pequena dimensão [2, 3].

Consiste num longo tubo metálico (figura 2.9), onde numa extremidade se coloca a amostra a testar e na outra extremidade existe um pequeno altifalante com uma abertura para fazer passar uma pequena vareta metálica ligada a um microfone que desliza sobre rodas num recipiente. O altifalante cria ondas estacionárias devidas à interação da onda incidente com a onda refletida na amostra (figura 2.10), o que permite, pela forma da onda estacionária, retirar a informação necessária para determinar o coeficiente de absorção sonora do material. O coeficiente calcula-se através da expressão (2.16) [4].

$$\alpha = 1 - \left(\frac{SWR-1}{SWR+1} \right)^2, \text{ com } SWR = \frac{|P_{\max}|}{|P_{\min}|} \quad (2.16)$$

Sendo:

- α - coeficiente de absorção sonora (adimensional);
- SWR - *standing wave ratio*;
- P_{\max} - pressão sonora máxima da onda estacionária;
- P_{\min} - pressão sonora mínima da onda estacionária.



Figura 2.9 - Tubo de ondas estacionárias (adaptado de [4])

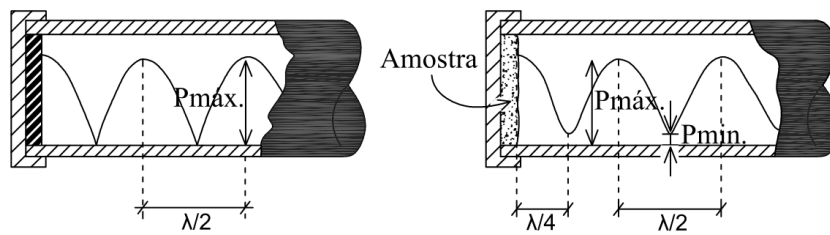


Figura 2.10 - Esquema de funcionamento do tubo de ondas estacionárias (adaptado de [4])

O método da câmara reverberante é mais realista, pois o som atinge a amostra de todos os ângulos (campo difuso), contrariamente ao método do tubo de ondas estacionárias em que o coeficiente de absorção se refere a uma incidência unicamente perpendicular das ondas sonoras [4].

No método da câmara reverberante a amostra é colocada no pavimento e deve apresentar uma área entre 10 e 12 m². A câmara reverberante (figura 2.11) é uma sala com um tempo de reverberação muito longo, pelo facto de todas as suas superfícies serem muito refletoras. O coeficiente de absorção da amostra (α_s) é determinado através da comparação do tempo de reverberação da câmara vazia e do tempo de reverberação da câmara com a amostra. O α_s obtido em câmara reverberante pode assumir valores ligeiramente superiores à unidade (fisicamente impossível), devido a efeitos de difração do som nos bordos do material (encurvamento dos raios da onda sonora quando esta encontra obstáculos à propagação), que fazem com que a amostra pareça maior e conseqüentemente provocam um aumento da absorção sonora. No entanto, em projeto esses valores superiores à unidade nunca devem ser utilizados [4].

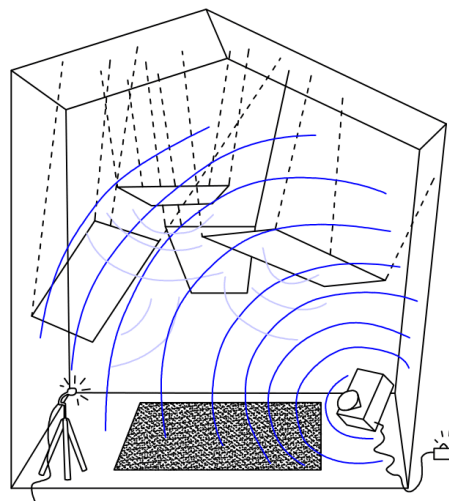


Figura 2.11 - Câmara reverberante com a amostra sobre o pavimento (adaptado de [4])

2.11. TEMPO DE REVERBERAÇÃO

Considerando uma fonte sonora numa sala, as ondas sonoras que se criam nessa divisão podem ser de origem direta ou refletida.

As ondas sonoras de origem direta são as que percorrem a distância mais curta desde a fonte sonora ao recetor (linha reta), como tal, são as primeiras a ser ouvidas pelo recetor e estabelecem a percepção da direção a partir da qual o som é proveniente [2, 4].

As ondas sonoras refletidas chegam ao recetor após o som direto e resultam das reflexões (únicas ou múltiplas) em superfícies existentes na sala [4]. As reflexões ajudam a definir o som característico da sala pois transmitem informações sobre o seu tamanho, forma e composição dos seus limites [2].

O tempo de reverberação (T) define-se como o intervalo de tempo necessário para que o nível de pressão sonora decresça 60 dB, após interrompida a emissão na fonte sonora [4, 15]. No entanto, este decaimento de 60 dB, geralmente não é possível devido ao ruído de fundo que se sobrepõe antes da “extinção” do som emitido. Como tal, é frequente considerar-se um decaimento de 30 ou 20 dB do qual se extrapola o respetivo valor para 60 dB (figura 2.12) [4, 7].

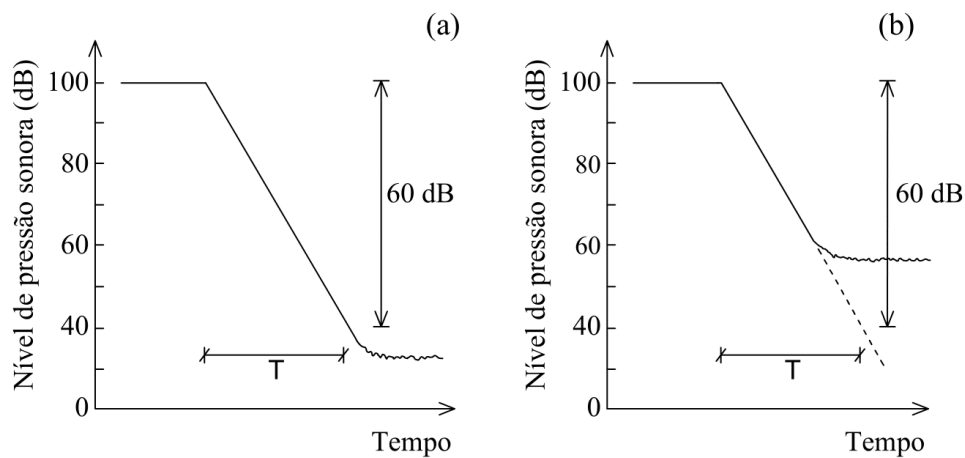


Figura 2.12 - Definição do tempo de reverberação (T): (a) valor teórico; (b) valor determinado por extrapolação do declive (adaptado de [2])

O tempo de reverberação é a grandeza utilizada com mais frequência para caracterizar a acústica de espaços [8]. Pode ser previsto a partir de métodos simplificados, como o desenvolvido por Wallace Clement Sabine, cuja fórmula de cálculo se apresenta na equação (2.17). Esta expressão permite obter valores muito próximos da realidade para locais com campos difusos e com um coeficiente de absorção sonora médio inferior a 0,20 [4].

$$T = \frac{0,16V}{A} \quad (2.17)$$

Sendo:

T - tempo de reverberação (s);

V - volume do compartimento (m³);

A = $\sum_{i=1}^N (\alpha_i S_i)$ - absorção sonora equivalente das N superfícies da sala (m²);

S_i - superfície real do material i (m²);

α_i- coeficiente de absorção sonora do material i (adimensional).

A fórmula de Sabine também pode ser apresentada em termos gerais através da expressão (2.18) [4].

$$T = \frac{0,16V}{\sum_{i=1}^N (\alpha_i S_i) + \sum_{j=1}^M A_j + m'V} \quad (2.18)$$

Sendo:

A_j - absorções sonoras localizadas;

m' - absorção sonora do ar (m^{-1}) em função da humidade relativa;

V - volume do ar (m^3).

Existem ainda outras expressões para a determinação do tempo de reverberação, como as fórmulas de Eyring, de Millington-Sette e de Kuttruff, que apresentam uma adaptação da fórmula de Sabine a espaços com diferentes características [4].

É importante referir que o tempo de reverberação numa sala tem um duplo efeito. Por um lado, aumenta o nível sonoro (por acréscimo do som refletido ao som direto) o que é um efeito positivo, mas, por outro lado, mascara os sons diretos (pois o som refletido sobrepõe-se ao som direto) o que representa um efeito negativo na maioria das situações [4].

O efeito negativo do tempo de reverberação na perceção da palavra deve-se à baixa intensidade e curto período de duração das consoantes ($\cong 20$ ms), que são suplantadas pelo “rasto sonoro” de vogais imediatamente antecedentes, estas emitidas com intensidade elevada e duração de cerca de 90 ms [4].

A ilustração do efeito negativo referido encontra-se na figura 2.13, onde se analisa a palavra *back* em duas situações de tempos de reverberação diferentes (0,5 e 1,5 s). Sob a influência de um curto tempo de reverberação de 0,5 segundos, quer o “ba” quer o som “ck” são perfeitamente inteligíveis. No entanto, quando o tempo de reverberação aumenta para 1,5 segundos, como é demonstrado na figura 2.13 pelas linhas a tracejado, as consoantes “ck” ficam completamente suplantadas pelo rasto sonoro de “ba”, tornando a palavra *back* impercetível [2].

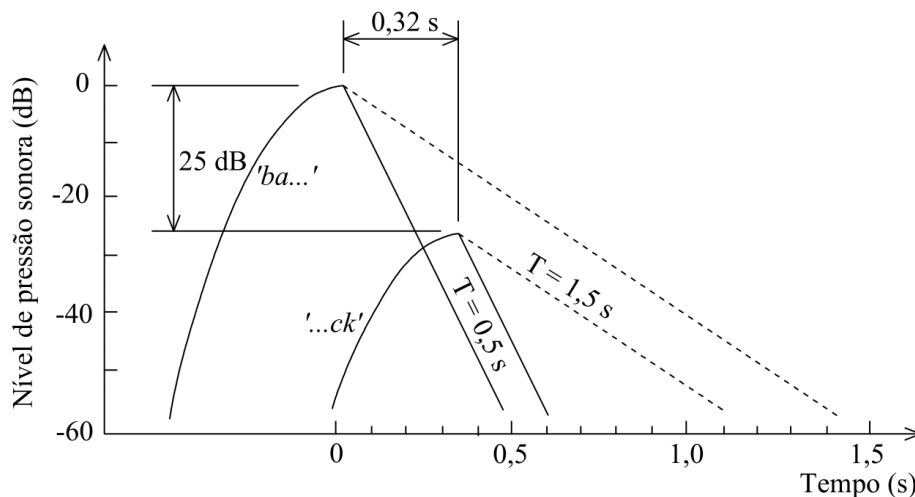


Figura 2.13 - Efeito de dois tempos de reverberação distintos (0,5 s a contínuo e 1,5 s a tracejado) na inteligibilidade da palavra *back* (adaptado de [2])

O quadro 2.5 apresenta os valores ideais dos tempos de reverberação em função do tipo de utilização do espaço.

Quadro 2.5 - Valores ideais para o tempo de reverberação em função do tipo de utilização do espaço (adaptado de [4])

Função	Tempo de reverberação 500 - 1 000 Hz (s)
Auditório	0,7 - 0,8
Teatro	0,7 - 0,9
Cinema	0,8 - 1,0
Estúdio de gravação	0,4 - 0,6
Música sinfónica barroca	1,4 - 1,6
Música sinfónica clássica	1,6 - 1,8
Música sinfónica romântica	1,9 - 2,2
Música sinfónica moderna	1,4 - 1,9
Música popular	0,8 - 1,0
Música de órgão	2,5 - 3,5
Coros gregorianos	3,0 - 4,0

2.12. MATERIAIS E SISTEMAS ABSORVENTES SONOROS

Em Acústica, geralmente utiliza-se a designação “material absorvente sonoro” quando a absorção resulta apenas das características físicas do material (como a sua espessura, textura superficial, massa volúmica, entre outros), enquanto que o “sistema absorvente sonoro” corresponde à designação dada quando a absorção resulta significativamente da sua ligação aos outros elementos da construção [15].

De uma maneira geral, todos os materiais absorvem energia sonora em maior ou menor quantidade e, como tal, podem ser utilizados para absorver as reflexões das ondas sonoras, quando estas são indesejáveis. Os materiais e sistemas absorventes sonoros podem agrupar-se em três grandes categorias: porosos e fibrosos, ressoadores e membranas [4]. Como é possível observar na figura 2.14, os materiais porosos ou fibrosos são mais eficazes em altas frequências (acima dos 1 000 Hz), os ressoadores são normalmente mais eficazes em frequências médias (sensivelmente entre os 400 e os 1 000 Hz) e as membranas apresentam uma maior absorção sonora para baixas frequências [7].

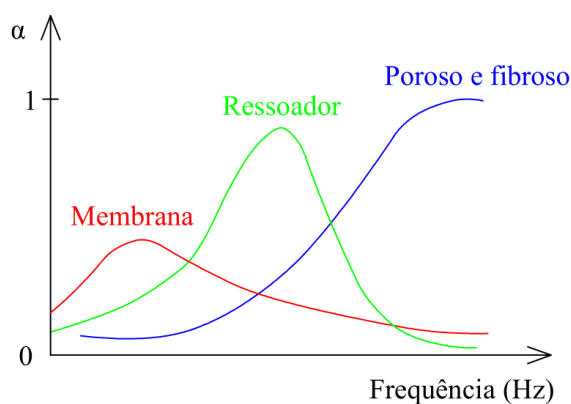


Figura 2.14 - Comportamento em frequência do coeficiente de absorção sonora de diferentes materiais absorventes sonoros (adaptado de [4])

A absorção dos materiais porosos e fibrosos (tecidos, alcatifas, massas porosas, aglomerados de fibras de madeira, espumas flexíveis de poliuretano, poliuretano expandido, aglomerados de cortiça, entre outros) advém da existência de poros e interstícios. Nos materiais fibrosos as ondas sonoras incidentes originam pequenos movimentos das suas fibras, transformando assim energia em calor. A eficácia dos materiais fibrosos depende principalmente da sua densidade e espessura, enquanto que a eficiência dos materiais porosos depende da sua aptidão para dissipar energia nos seus poros (figura 2.15) [4].



Figura 2.15 - Exemplo de absorsor suspenso em espuma de resina de melamina (adaptado de [18])

Um ressoador (também designado ressoador de cavidade ou ressoador de Helmholtz) é um sistema de absorção sonora constituído por uma cavidade de paredes rígidas com um pequeno orifício, que apresenta uma forma análoga à de uma garrafa (figura 2.16). É possível obter a sua frequência de eficácia máxima através da expressão (2.19) [4].

$$f = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{V(l + 1,6r)}} \quad (2.19)$$

Sendo:

- c - celeridade do ar (m/s);
- S - área do orifício de entrada (m²);
- V - volume da cavidade interior (m³);
- l - comprimento do gargalo/pescoço (m);
- r - raio do orifício de entrada do ressoador (m).

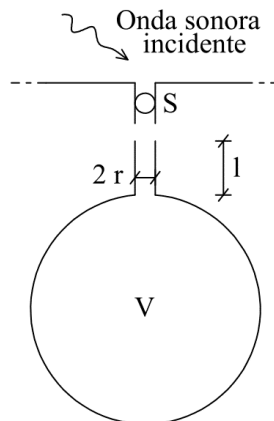


Figura 2.16 - Esquema de um ressoador impulsionado por uma onda sonora (adaptado de [19])

O caso mais habitual deste sistema são os ressoadores agrupados (geralmente painéis metálicos ou de madeira perfurados, bastante utilizados em tetos falsos), que se podem visualizar nas figuras 2.17 e 2.18. A frequência eficaz máxima dos ressoadores agrupados determina-se aplicando a expressão (2.20). Até uma percentagem de furação de cerca de 25%, quanto maior for a taxa de furação do sistema maior será a eficácia do painel, no entanto, a partir dos 25% o painel passa a ser controlado pelo efeito de porosidade do material absorvente [4].

$$f = \frac{10c}{2\pi} \sqrt{\frac{P}{(e + 1,6(r \times 10^2)) \times (d \times 10^2)}} \quad (2.20)$$

Sendo:

- c - celeridade do ar (m/s);
 - P - percentagem de área perfurada (%);
 - d - largura da caixa de ar (m);
 - e - espessura da placa perfurada (cm);
 - r - raio de cada perfuração (m).
- Validade: $f \cdot d < 3400$ Hz.cm

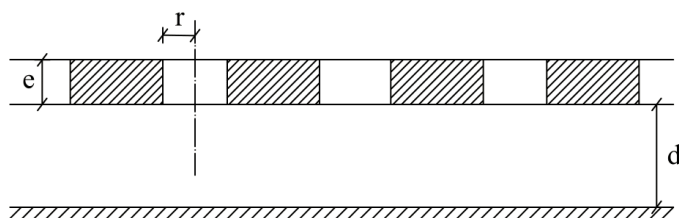


Figura 2.17 - Esquema de ressoador agrupado (adaptado de [4])



Figura 2.18 - Exemplo de painéis com superfície perfurada (adaptado de [20])

As membranas (geralmente um painel de madeira, aglomerado ou gesso), também designadas como membranas ressonantes ou painéis vibrantes (figuras 2.19 e 2.20), são sistemas de absorção sonora com uma estrutura de pequena espessura que entra em vibração com a incidência das ondas sonoras. Deste modo, quando o material entra em flexão, dissipam a energia das ondas sonoras incidentes através de perdas de calor por fricção nas suas fibras. O sistema absorve energia para a frequência do som incidente que corresponde à sua frequência natural de vibração, equação (2.21) [4].

$$f = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho}{m \cdot d}} \cong \frac{60}{\sqrt{m \cdot d}} \quad (2.21)$$

Sendo:

- c - celeridade (m/s);
- ρ - massa volúmica do ar (kg/m^3);
- m - massa superficial (kg/m^2);
- d - largura da caixa de ar (m).

Em muitos casos, a correção acústica de espaços, não se restringe a uma gama apertada de frequências, mas sim a uma vasta gama de frequências. Nesse sentido, a aplicação de soluções mistas que garantam uma absorção sonora elevada e equilibrada em toda a gama audível pode ser a solução mais adequada. Desta forma, soluções constituídas por painéis perfurados de pequena espessura (que funcionam simultaneamente como ressoadores e como membranas) com materiais porosos ou fibrosos no interior da caixa de ar são das soluções construtivas mais utilizadas na correção acústica [7].

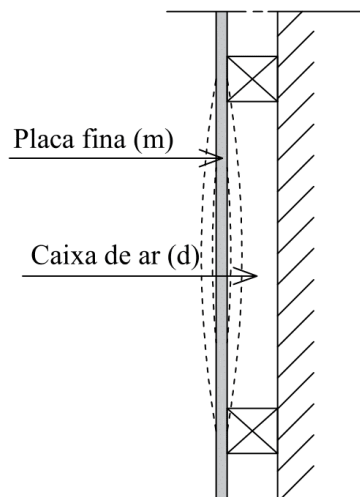


Figura 2.19 - Esquema de membrana ressonante (adaptado de [10])



Figura 2.20 - Exemplo de painéis vibrantes em madeira colocados num auditório (adaptado de [21])

2.13. CAMPO DIRETO E CAMPO REVERBERADO

O campo direto tem origem nas ondas sonoras diretas e, como tal, depende da distância à fonte (r) e da direcionalidade da onda sonora (Q), enquanto que o campo reverberado como tem origem nas ondas sonoras refletidas, varia com a absorção sonora do espaço (A). Na expressão (2.22) a primeira parcela no argumento do logaritmo representa o campo direto e a segunda parcela o campo reverberado [4].

$$L_I = L_W + 10\log\left(\frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R}\right) \text{ ou } \Delta L = L_I - L_W = 10\log\left(\frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R}\right) \quad (2.22)$$

Sendo:

L_I - nível de intensidade sonora perceptível, $\cong L_p$ (dB);

L_W - nível de potência sonora da fonte (dB);

Q - coeficiente de direcionalidade da fonte sonora ($Q = 1$ se a fonte for omnidirecional, $Q = 2$ se essa fonte sonora omnidirecional for colocada junto a uma superfície refletora, $Q = 4$ se for posicionada junto da interseção de duas superfícies, num canto, e $Q = 8$ quando posicionada junto da interseção de três superfícies, duplo canto);

r - raio entre a fonte sonora e o ouvinte (m);

R - “constante R do local” = $A/(1 - \alpha_{\text{médio}})$ (m^2).

A figura 2.21 apresenta um exemplo de campo direto e reverberado e demonstra a influência da distância à fonte sonora e da absorção nos dois campos sonoros, que se caracteriza pela diminuição do campo direto com a distância à fonte e pela variação do campo reverberado em função da absorção sonora da sala.

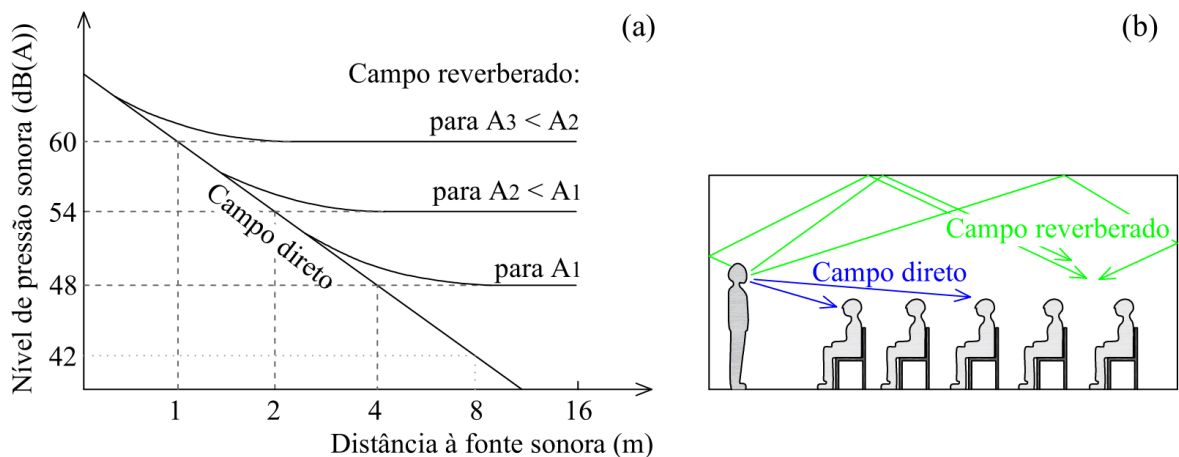


Figura 2.21 - (a) Influência da distância à fonte sonora e da absorção sonora da sala no campo direto e reverberado; (b) exemplo de campo direto e de campo reverberado (adaptado de [22])

Através dos conceitos referidos é facilmente compreensível que na correção acústica de salas, onde existe grande produção de ruído, tanto se pode atuar no campo direto, aumentando a distância à fonte ou diminuindo o coeficiente de direcionalidade, como também é possível atuar no campo reverberado, aumentando a absorção sonora [4].

2.14. FONTES DE RUÍDO EM SALAS DE AULA

Considerando uma sala de aula onde não está a decorrer nenhuma atividade, isto é, na ausência de ruído produzido pela fonte ou conjunto de fontes sonoras, o ruído de fundo corresponde a todo o ruído que existe no interior da mesma. Este, pode ter origem no sistema de climatização e/ou ventilação, nas instalações elétricas e/ou hidráulicas, em espaços adjacentes, no exterior do edifício (ruído de tráfego, entre outros) e em equipamentos (computadores, vídeo projetor, entre outros) [7].

As fontes de ruído existentes nas escolas contribuem diretamente para o ruído de fundo, que é um dos principais fatores a influenciar a inteligibilidade da palavra.

A interferência do ruído de fundo no diálogo é essencialmente um problema de mascaramento, na medida em que, elevando o limiar da audição devido ao ruído de fundo a inteligibilidade da palavra diminui [8].

Para avaliar o desconforto num local interior devido ao ruído de fundo (estável e contínuo) provocado por equipamentos, utilizam-se curvas de incomodidade que permitem caracterizar os equipamentos mecânicos a utilizar em espaços destinados à palavra [4].

A classificação NC (*Noise Criterion*) é definida pelos seus níveis de pressão sonora para oito bandas de 1/1 oitava (entre os 63 e os 8 000 Hz) e é amplamente utilizada para estabelecer os níveis de ruído máximos recomendados para diferentes tipos de salas, dependendo da sua utilização. No quadro 2.6 estão representados alguns valores máximos recomendados para a curva NC em função de diferentes aplicações.

A curva NR (*Noise Rating*) é muito idêntica à curva NC, utiliza as bandas de frequências dos 32 aos 8 000 Hz com o método da tangente e é muito utilizada na Europa [4].

A colocação dos níveis de pressão sonora num espectro como o das duas curvas de incomodidade representadas na figura 2.22 permite classificar o incómodo causado pelo equipamento.

Quando não é possível substituir os equipamentos e estes ultrapassam os índices de incomodidade é conveniente proceder ao seu isolamento.

Quadro 2.6 - Curvas NC dos níveis de ruído de fundo máximos recomendados em função da utilização (adaptado de [23])

Tipo de local	Curva NC recomendada (dB)
Estúdios de gravação	15
Salas de espetáculos e teatros	15-25
Habitacões e quartos de hotéis	20-30
Salas de conferências e de aulas	20-30
Escritórios e bibliotecas	30-35
Recintos desportivos	40-50

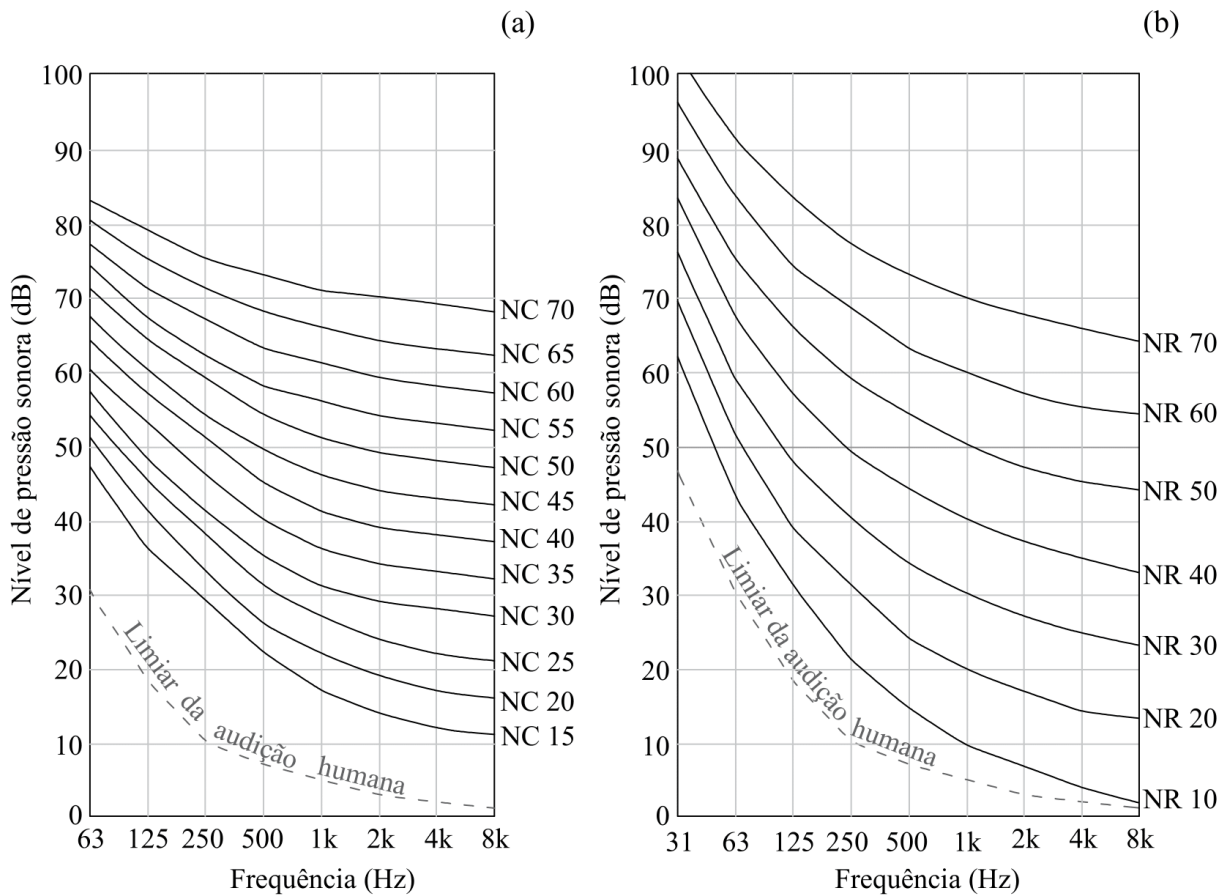


Figura 2.22 - (a) Curvas NC; (b) curvas NR (adaptado de [24])

2.15. INTELIGIBILIDADE DA PALAVRA

Considerando um emissor num espaço fechado, a inteligibilidade da palavra representa o grau de percepção das palavras transmitidas, que um recetor na mesma divisão consegue ouvir.

No geral, poucas vezes o recetor ouve uma réplica exata do sinal sonoro original, o que exige um maior esforço por parte do orador e do recetor para que a comunicação seja produtiva.

Deste modo, o desempenho acústico de salas destinadas à aprendizagem de crianças assume elevada importância dado que elas ainda não possuem conhecimento de um vasto vocabulário que lhes permita uma correta comunicação verbal. É, portanto, fundamental garantir que todos os intervenientes na sala de aula consigam ser ouvidos e compreendidos, principalmente quando estão a ser expostos a assuntos novos ou quando a exposição exige uma outra atividade em simultâneo.

Para assegurar uma conveniente inteligibilidade da palavra é necessário ter em consideração a variabilidade da emissão da voz humana relativamente à frequência, à intensidade, à duração e à direcionalidade. Estas características encontram-se definidas no quadro 2.7 para vogais e consoantes, respetivamente [4].

Quadro 2.7 - Variabilidade da emissão da voz entre vogais e consoantes (adaptado de [4])

Tipo	Frequência	Intensidade	Duração	Direccionalidade
Vogais	baixas	elevada	$\cong 90$ ms	perdem 5 dB para trás
Consoantes	altas	baixa	$\cong 20$ ms	perdem 20 dB para trás

A análise da inteligibilidade da palavra apoia-se em parâmetros subjetivos e objetivos. Os subjetivos baseiam-se na leitura de palavras ou frases a um grande número de ouvintes que as escrevem, enquanto os objetivos não necessitam da intervenção subjetiva humana na sua determinação [4].

Os parâmetros objetivos mais utilizados são o índice de articulação (AI), o nível de interferência na conversação (SIL), o *articulation class* (AC), o *speech transmission index* (STI) e ainda o *rapid speech transmission index* (RASTI). No entanto, o método que será utilizado neste trabalho é o RASTI que é o método mais rápido e prático de avaliar o STI. O RASTI é avaliado através de um emissor (altifalante) e de um recetor (microfone) e permite classificar um espaço entre 0 e 1, para uma má e excelente inteligibilidade da palavra, respetivamente. A classificação apresenta-se no quadro 2.8 [4].

Quadro 2.8 - Tabela de conversão do valor do RASTI (*rapid speech transmission index*) numa escala subjetiva de inteligibilidade da palavra (adaptado de [25])

RASTI	Inteligibilidade
[0,00-0,30[Má
[0,30-0,45[Medíocre
[0,45-0,60[Suficiente
[0,60-0,75[Bom
[0,75-1,00]	Excelente

2.16. SÍNTESE DO CAPÍTULO

Relativamente aos principais conceitos acústicos relevantes no contexto deste trabalho é possível referir que:

- O ser humano possui um sistema auditivo que lhe permite captar variações de pressão;
- A pressão sonora, medida em *pascal* (Pa), para se aproximar da resposta quase logarítmica do ouvido aos estímulos, pode ser convertida em níveis de pressão sonora (L_p) medidos em *decibel*. Por sua vez, os L_p podem ser adaptados à resposta subjetiva do ouvido humano ao serem corrigidos com a curva de ponderação A, passando a ser representados pelo nível de pressão corrigido, L_A em *decibel* (dB) ou L em *decibel A* (dB(A));
- O som e o ruído representam sensações auditivas opostas, tratando-se o ruído de um poluente que pode provocar, entre outros efeitos, perdas de concentração, interferências na comunicação oral, cansaço e irritação no ser humano;

- Quanto maior o tempo de reverberação maior o nível sonoro e, como tal, maior a sobreposição do som refletido sobre o som direto, o que influencia negativamente a inteligibilidade da palavra;
- Um ambiente sonoro com qualidade depende essencialmente da minimização do ruído de fundo no interior do espaço em estudo, do ajuste das características de reverberação do espaço em função da sua utilização, da adequação da distribuição do som no seu interior e da inteligibilidade dos sons no mesmo;
- A conjugação de materiais e sistemas absorventes sonoros (como materiais porosos e fibrosos, ressoadores e membranas) pode ser a solução mais adequada para melhorar o desempenho acústico de um determinado espaço, permitindo uma absorção equilibrada na gama de frequências audível (20 aos 20 000 Hz).

3

ACÚSTICA DE SALAS DE AULA

3.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo estudam-se os valores adequados para o tempo de reverberação, ruído de fundo e RASTI que permitem um desempenho acústico adequado em salas de aula.

Nesse sentido, apresentam-se os valores presentes nas legislações e normalizações de uma amostra de diversos países, que são depois comparados com os valores ideais obtidos em alguns estudos citados. Esta comparação é importante para garantir que se definem valores adequados para os parâmetros referidos, pois a legislação refere o mínimo aceitável, o que nem sempre significa que seja o mais apropriado.

3.2. VALORES PRESENTES NA LEGISLAÇÃO E NORMALIZAÇÃO

3.2.1. O CASO PORTUGUÊS

O primeiro texto legislativo na área da acústica de edifícios em Portugal surge em 1983 nos Açores, relacionado com a necessidade de controlo do ruído na vizinhança de edifícios hospitalares e escolares [26].

Somente em 1987, o decreto-lei 251/87 [27] aprova o primeiro Regulamento Geral sobre o Ruído. Este, foi revogado em 2000 dando lugar ao Regime Legal sobre a Poluição Sonora que reforçou a aplicação do princípio da prevenção em matéria de ruído. Por sua vez, em 2007 foi substituído pelo Regulamento Geral do Ruído (RGR), aprovado pelo decreto-lei 09/07 [28]. O Regulamento Geral do Ruído em vigor visa o controlo da poluição sonora em termos repressivos, mas também de forma preventiva, aplica-se aos conceitos de atividade ruidosa permanente ou temporária e é igualmente aplicável ao ruído de vizinhança.

O RGR [28] define que compete aos municípios estabelecer nos planos municipais de ordenamento do território a classificação, a delimitação e a disciplina das zonas sensíveis e das zonas mistas. Refere ainda que a zona sensível é vocacionada para, entre outros, o uso escolar, podendo conter pequenas unidades de comércio e de serviços destinadas a servir a população local, tais como cafés e outros estabelecimentos de restauração, papelarias e outros estabelecimentos de comércio tradicional, sem funcionamento no período noturno. Uma vez que este trabalho tem como âmbito uma escola, considera-se importante mencionar que segundo o RGR as zonas sensíveis não devem ficar expostas a ruído ambiente exterior L_{den} (indicador de ruído diurno-entardecer-noturno) superior a 55 dB(A) e L_n (indicador de ruído noturno) superior a 45 dB(A).

No que concerne à acústica de edifícios, o decreto-lei 129/02 [29] e, após sucessivas atualizações, o atual decreto-lei 96/08 [30] aprovaram o Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios (RRAE).

Este documento especifica as características acústicas necessárias para a melhoria da qualidade e ambiente acústico no âmbito do regime da edificação. Para o presente trabalho, apenas interessa analisar o artigo 7º do RRAE [30], que se aplica a edifícios escolares e similares, e de investigação.

Segundo o RRAE [30], os valores limites dos parâmetros acústicos a respeitar pelos estabelecimentos escolares apresentam-se nos quadros 3.1 e 3.2.

É importante referir que o tempo de reverberação no interior dos locais corresponde à média aritmética dos valores obtidos para as bandas de oitava centradas nas frequências de 500, 1 000 e 2 000 Hz e que os valores presentes no quadro 3.1 são para condições de salas de aula mobiladas e sem ocupação.

Quadro 3.1 - Valor máximo do tempo de reverberação (T) segundo o RRAE, Portugal (adaptado de [30])

Local	$T_{\text{médio}} (500 - 2k \text{ Hz}) (s) \leq$
Sala de aula, biblioteca, sala polivalente, refeitório e ginásio	$0,15 \times V^{1/3}$

$V =$ Volume interior (m^3).

O nível de avaliação do ruído particular de equipamentos do edifício ($L_{Ar,nT}$) deve satisfazer as condições indicadas no quadro 3.2 no interior dos locais aí estabelecidos.

Quadro 3.2 - Valores máximos do nível de avaliação do ruído particular de equipamentos do edifício ($L_{Ar,nT}$) segundo o RRAE, Portugal (adaptado de [30])

Local	$L_{Ar,nT} (dB) \leq$
Sala de aula (incluindo sala de aula musical), sala de professores, sala administrativa, gabinete médico, sala polivalente e berçário	40, se em funcionamento intermitente 35, se em funcionamento contínuo

O RRAE utiliza ainda um fator de incerteza da medição (I), que no caso do $L_{Ar,nT}$ diz respeito a uma diminuição de 3 dB, enquanto que no valor obtido para o tempo de reverberação diz respeito a uma diminuição de 25% do limite regulamentar.

3.2.2. REINO UNIDO

O Reino Unido é formado por quatro países (Inglaterra, País de Gales, Irlanda do Norte e Escócia) que possuem textos distintos relativamente aos regulamentos de construção em vigor.

Em 2003 o governo aprovou, na Inglaterra e no País de Gales, a edição original do *Approved Document E: Resistance to the Passage of Sound*. Este documento, publicado com o intuito de fornecer orientações sobre como cumprir o *The Building Regulations 2010*, possui várias atualizações, sendo que a mais atual [31] data de 2015. Relativamente ao Requisito E4 presente no *Approved Document E* [31], que trata sobre as condições acústicas em escolas, lê-se que “a forma de satisfazer o Requisito E4 será o de atender aos valores de isolamento sonoro, tempo de reverberação e ruído ambiente interno, que são fornecidos no *Building Bulletin 93 Acoustic Design of Schools: Performance Standards (BB93)*, publicado pelo Departamento de Educação”.

Na Irlanda do Norte foi publicado um texto técnico, *Technical Booklet G - Resistance to the Passage of Sound* em 2012 [32] onde o *Department of Finance and Personnel* fornece orientações sobre como cumprir os requisitos técnicos do *The Building Regulations (Northern Ireland) 2012*. Conforme o que acontece em Inglaterra e no País de Gales, também o *Technical Booklet G* [32] da Irlanda do Norte refere que, neste caso, o requisito 52 (condições acústicas em escolas) do regulamento de construção em vigor deve ser cumprido em conformidade com os valores apresentados no *BB93* [33].

De modo análogo, na Escócia o *Technical Handbook* [34], publicado em 2017, define o *BB93* [33] como o padrão de desempenho necessário para o cumprimento do *The Building Regulations (Scotland)* de 2004 e respetivas atualizações.

Deste modo, o *BB93* publicado em 2003, estabelece normas mínimas de desempenho para a acústica de edifícios escolares e descreve os meios normais para demonstrar a conformidade com os regulamentos de construção em vigor no Reino Unido.

A versão de 2015 do *Building Bulletin 93* [33] apresenta os valores recomendados para o tempo de reverberação em edifícios novos acabados, mobilados e sem ocupação, e os níveis sonoros contínuos equivalentes do ruído de fundo para um período de 30 minutos ($L_{Aeq,30min}$), que se encontram no quadro 3.3 e que devem ser apresentados como requisitos do dono de obra. Limita também o *speech transmission ratio* (STI) de salas de aula em *open plan spaces* a um valor mínimo de 0,60, no entanto não apresenta requisitos para o STI em salas de aula regulares.

Quadro 3.3 - Valores limite do nível sonoro contínuo equivalente do ruído de fundo para um período de 30 minutos ($L_{Aeq,30min}$) e do tempo de reverberação (T) segundo o *BB93*, Reino Unido (adaptado de [33])

Local	$L_{Aeq,30min}$ (dB) ≤	$T_{médio}$ (500 - 2k Hz) (s) ≤
Infantário, sala de aula do ensino básico	35	0,6
Sala de aula para alunos com necessidades especiais de audição e/ou comunicação	30	0,4

3.2.3. ESTADOS UNIDOS DA AMÉRICA

Em 1929 foi fundada nos Estados Unidos da América (EUA), a sociedade científica *Acoustical Society of America* (ASA), que tinha como objetivo o “desenvolvimento de padrões acústicos relacionados com a terminologia, procedimentos de medição e critérios para determinar os efeitos do ruído” [35].

Desde 1990, a ASA assumiu um papel de liderança na promoção de uma melhor acústica nas salas de aula e em 2000 publicou o *Classroom Acoustics I* [36]. Nesta publicação é recomendado que salas de aula típicas de aproximadamente 30 estudantes, onde o discurso é feito pela frente da sala ou os alunos trabalham em pequenos grupos, possuam tempos de reverberação situados entre os 0,4 e 0,6 s.

O documento [36] sugere que idealmente uma sala de aula de estilo de leitura deve mover parte da absorção sonora do teto para as paredes e manter o meio do teto rígido para refletir a voz do professor para a parte de trás da sala. Para refletir mais som para a parte de trás da sala, o teto sobre a localização do professor (frente da sala) deve ser composto por uma superfície refletora e pode ainda ser inclinado, como se representa na figura 3.1. Podem ainda colocar-se materiais absorventes nas paredes e alcatifa no revestimento de piso de modo a obter uma solução com um tempo de reverberação baixo, sem ecos, distribuição adequada de reflexões e baixo ruído próprio (figura 3.1).

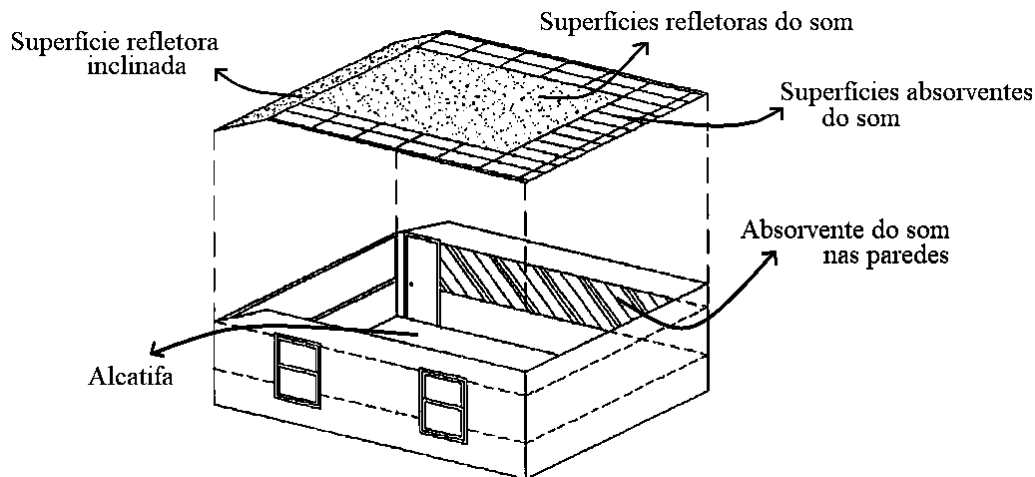


Figura 3.1 - Correção acústica ideal para uma sala de aula, com tratamento absorvente de som em três paredes, alcatifa no pavimento, um refletor de teto inclinado na frente e superfícies absorventes de som no teto, exceto no centro onde tem superfícies refletoras (adaptado de [36])

A ASA publicou em 2002 a norma ANSI S12.60 [37] que definiu os níveis máximos do tempo de reverberação e do ruído de fundo permitidos em salas de aula. A norma americana [37], desenvolvida pelo *Accredited Standards Committee S12 Noise*, atualmente possui dois volumes, a ANSI/ASA S12.60/Part 1 [38], que se aplica a salas de aula e outros espaços de aprendizagem em escolas permanentes, e a ANSI/ASA S12.60/Part 2 [39], para salas de aula provisórias, normalmente utilizadas com carácter transitório (exemplo: construções leves modulares).

No quadro 3.4 apresentam-se, segundo a norma ANSI/ASA S12.60/Part 1 [38], os valores limite do nível sonoro contínuo equivalente do ruído de fundo para um período de 60 minutos ($L_{Aeq,60min}$), para o qual o cálculo deve incluir o som de todas as fontes e caminhos AVAC (aquecimento, ventilação e ar condicionado) relevantes, e os valores limite recomendados para o tempo de reverberação (T), em compartimentos mobilados e sem ocupação.

Para além do *Classroom Acoustics I* [36], a ASA publicou mais dois textos alusivos à acústica de salas de aula, o *Classroom Acoustics II* [40] relacionado com as barreiras acústicas à aprendizagem e o *Classroom Acoustics for Architects* [41], um texto complementar à norma ANSI/ASA S12.60.

Quadro 3.4 - Valores limite recomendados do nível sonoro contínuo equivalente do ruído de fundo para um período de 60 minutos ($L_{Aeq,60min}$) e do tempo de reverberação (T) segundo a ANSI/ASA S12.60/Part 1, Estados Unidos da América (adaptado de [38])

Sala de aula	$L_{Aeq,60min}$ (dB) ≤	$T_{médio}$ (500 - 2k Hz) (s) ≤
$V \leq 283 \text{ m}^3$	35	0,6 (**)
$283 \text{ m}^3 < V \leq 566 \text{ m}^3$	35	0,7
$V > 566 \text{ m}^3$	40 (*)	Nenhum requisito

(*) Se os corredores tiverem apenas a função de passagem admitir 45 dB;

(**) Salas com volume inferior a 283 m^3 devem ser adaptadas para permitir a redução do tempo de reverberação para 0,3 segundos para crianças que apresentem alguma deficiência auditiva e/ou outros problemas de comunicação;

V = Volume interior (m^3).

3.2.4. ESPANHA

Em Espanha, o *Real Decreto 1371/07* [42] aprova o documento de base *DB-HR Protección frente al ruido* [43] do *Código Técnico de la Edificación*. O *DB-HR Protección frente al ruido* [43] estabelece, no interior de edifícios e sob condições normais de uso, regras que permitem cumprir as exigências básicas de conforto em relação ao ruído.

No quadro 3.5 apresentam-se os valores máximos presentes no *DB-HR* [43], relativamente ao tempo de reverberação a utilizar nos locais aí referidos.

No que concerne ao ruído de fundo, o *Real Decreto 1367/07* [44], que resulta da *Ley 37/2003 del Ruido* [45], define limites aplicáveis para os níveis sonoros L_d , L_e e L_n , para horário diurno, entardecer e noturno, respetivamente (quadro 3.6). Os valores do quadro 3.6 referem-se aos índices resultantes do conjunto de emissores acústicos que têm um impacto sobre o interior do compartimento (como instalações do próprio edifício, atividades realizadas no interior do edifício ou em edifícios adjacentes e ruído exterior transmitido para o interior).

Quadro 3.5 - Valores máximos do tempo de reverberação (T) segundo o *DB-HR*, Espanha (adaptado de [43])

Local	$T_{\text{médio}} (500 - 2k \text{ Hz}) (s) \leq$
Sala de aula e de conferência, sem ocupação nem mobiliário com volume $\leq 350 \text{ m}^3$	0,7
Sala de aula e de conferência, sem ocupação, mas com mobiliário com volume $\leq 350 \text{ m}^3$	0,5

Quadro 3.6 - Objetivos de qualidade acústica aplicáveis para o ruído de fundo interior de edifícios de uso educacional segundo o *Real Decreto 1367/07*, Espanha (adaptado de [44])

Uso do edifício	Local	Índice de ruído (dB(A)) \leq		
		L_d	L_e	L_n
Educativo o cultural	Sala de aula	40	40	40
	Sala de leitura	35	35	35

L_d , L_e e L_n correspondem aos níveis sonoros para horário diurno, entardecer e noturno, respetivamente.

3.2.5. FRANÇA

Em França, em cumprimento do *code de la construction et de 'habitation* francês, o 5º artigo do *Arrêté du 25 avril* de 2003 relativo à limitação do ruído nos estabelecimentos de ensino [46], estabelece nos quadros 3.7 e 3.8 os valores dos tempos de reverberação máximos, que devem ser respeitados para instalações normalmente mobiladas e desocupadas, e os níveis de pressão sonora normalizada máximos gerados pelos equipamentos do edifício (L_{nAT}), respetivamente.

Quadro 3.7 - Valores máximos do tempo de reverberação (T) segundo o *Arrêté du 25 avril*, França (adaptado de [46])

Local	$T_{\text{médio (500 - 2k Hz)}} (s) \leq$
Local de ensino, de música ou de estudo com $V \leq 250 \text{ m}^3$	$0,4 \leq T \leq 0,8$
Local de ensino, de música ou de estudo com $V > 250 \text{ m}^3$	$0,6 \leq T \leq 1,2$

V = Volume interior (m^3).

Quadro 3.8 - Valores máximos do nível de pressão sonora normalizada gerado pelos equipamentos do edifício (L_{nAT}) segundo o *Arrêté du 25 avril*, França (adaptado de [46])

Local	$L_{nAT} \text{ (dB)} \leq$
Sala de aula	43, se em funcionamento intermitente
	38, se em funcionamento contínuo

3.2.6. POLÓNIA

Em 2015 foi publicada a primeira norma polaca diretamente relacionada com a acústica de salas, PN-B-02151-4 [47].

Em 2017 foi atualizado o Regulamento do Ministro de Infraestrutura e Construção [48], que contém um anexo com uma lista de padrões polacos que tornou oficial e obrigatória a norma PN-B-02151-4 [47].

No quadro 3.9 apresentam-se os valores regulamentares máximos para o tempo de reverberação (T) e para o *speech transmission ratio* (STI) exigidos na Polónia a construções acabadas, mobiladas e não ocupadas.

Os requisitos para o T máximo devem ser atendidos em cada uma das bandas de oitava com frequências centrais de 250, 500, 1 000, 2 000, 4 000 e 8 000 Hz e na banda com frequência central de 125 Hz o valor do T pode ser até 30% maior do que o dado no quadro 3.9.

Quadro 3.9 - Valores do tempo de reverberação (T) e do *speech transmission ratio* (STI) em salas destinadas à comunicação verbal segundo a PN-B-02151-4, Polónia (adaptado de [49] *apud* [47])

Local	Volume (m^3)	$T_{\text{em cada banda de oitava (250 - 8k Hz)}} \text{ (**)} (s) \leq$	STI \geq
Salas e estúdios escolares, auditórios, salas de aula do ensino primário, secundário e superior e outras salas para fins semelhantes	≤ 120	0,6 (*)	-
	$> 120 \text{ e } \leq 250$	0,6 (*)	
	$> 250 \text{ e } \leq 500$	0,8	0,6
	$> 500 \text{ e } \leq 2\ 000$	1,0	
	$> 2\ 000$	Determinar individualmente	

(*) Em salas destinadas a turmas com pessoas com perda auditiva ou outros problemas como a comunicação verbal, o tempo máximo de reverberação não deve ser maior que 0,4 s. Em salas para ensino de línguas iniciais ou estrangeiras, recomenda-se reduzir o tempo de reverberação em 0,1 s. em relação aos valores dados no quadro 3.9;

(**) Para $f = 125 \text{ Hz}$ o $T_{125} \leq 1,3T$.

Relativamente ao ruído de fundo, a norma PN-B-02151-02 [50] define um valor máximo de 40 dB para o nível sonoro equivalente de ruído de fundo diurno (L_{Aeq}), proveniente de todas as fontes de ruído que têm impacto nas salas de aula.

3.2.7. BÉLGICA

A norma belga NBN S 01-400-2 [51] foi publicada em 2012 pelo *Bureau voor Normalisatie* (NBN) com o objetivo de definir critérios acústicos para edifícios escolares. Segundo o Real Decreto de 30 de setembro de 2012, publicado a 15 de outubro de 2012, a norma [51] entrou em vigor para novas construções ou renovações com pedido de licença a partir de 1 de janeiro de 2013.

No quadro 3.10 apresentam-se, segundo a NBN S 01-400-2 [51], os valores limite máximos do tempo de reverberação de espaços pertencentes a edifícios escolares acabados, desocupados e não mobilados e os valores limite máximos do nível sonoro percebido na sala quando as instalações operam simultaneamente ($L_{Aeq,nT,stat}$). O valor limite máximo do T corresponde à média dos valores do tempo de reverberação nas bandas de oitava de 500, 1 000 e 2 000 Hz.

A norma NBN S 01-400-2 [51] distingue dois níveis de requisitos, os “normais” e os “aumentados”, que se aplicam a espaços destinados a estudantes com restrições auditivas e/ou de comunicação. Se o requisito “aumentado” se aplicar, a superfície de materiais absorventes a colocar deve ser aumentada em 25% (requisito de projeto) ou o tempo de reverberação máximo em salas de aula deve ser reduzido em 20%. Relativamente ao $L_{Aeq,nT,stat}$, o contributo proveniente de instalações técnicas cujo ruído é normalmente observado por longos períodos (como instalações de aquecimento, ventilação e ar condicionado) possui requisitos “aumentados” 4 dB mais rigorosos.

Quadro 3.10 - Valores máximos do tempo de reverberação (T) e do nível sonoro percebido na sala quando as instalações operam simultaneamente ($L_{Aeq,nT,stat}$) segundo a NBN S 01-400-2, Bélgica (adaptado de [22] *apud* [51])

Local	$T_{\text{médio}} (500 - 2k \text{ Hz}) (s) \leq$	$L_{Aeq,nT,stat} (dB) \leq$
Sala de aula regular	$0,35 \times \log(1,25 \times V)$	35
Sala de aula provisória	0,8	40

V = Volume interior (m^3).

3.2.8. NORUEGA

A norma NS 8175 [52] corresponde ao mais importante padrão norueguês em acústica e ruído de edifícios. A norma [52] contém quatro classes de som (A, B, C e D) e refere os valores limite para residências, hospitais, lares de idosos, escolas, creches, alojamentos e edifícios de escritórios.

No quadro 3.11 apresentam-se os valores limite superiores para o tempo de reverberação nos espaços escolares considerados pertinentes para o estudo aqui presente, em função das quatro classes sonoras, A, B, C e D. O limite do T apresentado considera os compartimentos mobilados e desocupados e deve ser verificado para todas as bandas de 1/1 oitava dos 125 aos 4 000 Hz, com uma tolerância de +30% ([53] *apud* [52]). É importante ter conhecimento de que a classe A representa as melhores condições de som para os utilizadores, enquanto que a classe D diz respeito a condições sonoras pobres.

Segundo os regulamentos de tecnologia de construção em vigor na Noruega (TEK17) [54] “os requisitos de som baseiam-se no uso pretendido e podem ser atendidos satisfazendo a classe de som C do padrão norueguês NS 8175”.

Quadro 3.11 - Valores limite superior para o tempo de reverberação (s), em edifícios de ensino, mobilados e desocupados, segundo a NS 8175, Noruega (adaptado de [55] *apud* [52])

Local	Classe A	Classe B	Classe C	Classe D
Sala de aula e sala de reuniões	0,4	0,4	0,5	0,6

Classe A = melhores condições sonoras para os utilizadores, que apenas em situações excepcionais são afetados pelo ruído; Classe B = condições de som muito boas, mas os utilizadores podem ser perturbados pelo ruído em algumas circunstâncias; Classe C = condições sonoras satisfatórias para uma grande parte das pessoas afetadas; Classe D = condições sonoras mais pobres para os utilizadores, onde uma grande porção de pessoas pode ser incomodada pelo ruído.

A norma NS 8175 [52] indica ainda que o valor limite superior para o nível de ruído de fundo médio ($L_{p,A,T}$) para a classe de som C corresponde a 28 dB ([56] *apud* [52]).

3.3. VALORES IDEAIS

Segundo Woolworth *et al.* [41] é importante reconhecer que a melhoria acústica das salas de aula e a redução do ruído de fundo caminham de mãos dadas para alcançar uma inteligibilidade da palavra adequada e, como tal, ambos devem ser abordados em conjunto.

No capítulo 2 deste trabalho definiu-se o ruído de fundo como o ruído proveniente do ambiente exterior (tráfego rodoviário, indústrias, aeronaves, entre outras fontes), originário das conversas entre os estudantes nos intervalos entre aulas, de atividades de manutenção da própria escola, dos equipamentos e sistemas de aquecimento e/ou ventilação presentes no local recetor e também do ruído interno com origem nos espaços adjacentes (salas de aula, corredores, casas de banho, entre outros espaços).

Uma vez que o ruído de fundo é um dos principais fatores a influenciar a inteligibilidade da palavra, considera-se essencial que durante a avaliação e seleção do local de construção da escola e durante a fase de projeto sejam definidas estratégias de atenuação do mesmo [41].

Shield *et al.* [57] referem que quanto mais jovem é o estudante maior o efeito prejudicial de ambientes acústicos inadequados na compreensão e retenção do conhecimento que o professor transmite. Uma vez que, ao contrário dos adultos, as crianças não possuem o vocabulário suficiente para que entendam através de poucas palavras o contexto do que lhes está a ser transmitido, todas as palavras novas têm a necessidade de ser totalmente ouvidas para serem compreendidas.

Ao ruído de fundo une-se o efeito negativo do tempo de reverberação na perceção da palavra, que como referido no capítulo anterior, se deve à baixa intensidade e curto período de duração das consoantes ($\cong 20$ ms), que são suplantadas pelo “rasto sonoro” de vogais imediatamente antecedentes, emitidas com intensidade elevada e duração média de 90 ms. Assim, o que já era difícil para as crianças entender do discurso dos professores, devido ao ruído de fundo, complica-se ainda mais quando o tempo de reverberação elevado mascara os sons diretos.

Além das crianças, existem outros grupos de estudantes para os quais a compreensão dos professores e colegas pode ser difícil em salas de aula com más condições acústicas, como é o caso de estudantes com

deficiências auditivas, défices de atenção/hiperatividade, dificuldades de aprendizagem, dificuldades de fala e estudantes que não estão a ser ensinados na sua primeira língua [57]. Nestes estudantes, o fraco aproveitamento escolar, as dificuldades de compreensão, a diminuição da capacidade de atenção e de memorização, a falta de interesse pelo estudo, a inquietude e a irritabilidade podem ser efeitos da prolongada exposição ao ruído.

Segundo Garcia *et al.* [53] também os professores sentem as consequências de trabalhar em salas de aulas com más condições acústicas, sofrendo frequentemente de problemas de voz associados à alta carga vocal experimentada no trabalho, uma vez que em salas que apresentam elevado tempo de reverberação e/ou ruído de fundo, o professor sente a necessidade de aumentar o seu tom de voz para que possa ser compreendido pelos estudantes.

Com o objetivo de definir o tempo de reverberação em salas de aula que permite a existência das boas condições acústicas que se têm referido ao longo deste capítulo, Bradley [58] realizou diversos testes de inteligibilidade e medições acústicas em salas de aula ocupadas em Otava, no Canadá. Os testes realizaram-se durante o horário escolar habitual, em dez salas de aula com uma média de 24 estudantes por sala (de 12 e 13 anos). Durante os ensaios os alunos permaneceram calmos, não houve ruído significativo na sala de aula e o ruído de fundo era completamente representativo das condições normais. Os volumes das salas de aula variaram entre 253 e 529 m³ e as distâncias entre a fonte sonora e os recetores variaram de 2,9 a 8,0 m. Foram medidos em bandas de oitava, o tempo de reverberação (T), o tempo de decaimento curto (EDT), a claridade (rácios *early/late* para os limites iniciais de som de 35, 50 e 80 ms) e o tempo central (TS).

Depois de avaliadas as medidas acústicas da inteligibilidade da palavra, Bradley [58] determinou que as condições ótimas gerais para salas de aula, ou outras salas de tamanho similar destinadas à palavra, compreendiam valores de tempo de reverberação entre 0,4 e 0,5 s. Refere ainda que, para acomodar todos os grupos etários de ouvintes sem deficiências auditivas, são necessários níveis de ruído de fundo inferiores a 30 dB(A).

Bistafa *et al.* [59], realizaram um estudo com o objetivo de determinar o tempo de reverberação e o nível máximo de ruído de fundo para salas de aula com volumes de 100, 300 e 500 m³ nas suas melhores condições de inteligibilidade da palavra. Os parâmetros de medição da inteligibilidade da palavra utilizados correspondem ao rácio sonoro útil-prejudicial para 50 ms (U_{50}), ao STI (*speech transmission index*) e a fórmulas para prever a perda de articulação das consoantes (AL_{cons}). A comparação dos resultados obtidos pelos três parâmetros da inteligibilidade da palavra referidos, sob a suposição de um campo sonoro difuso com decaimentos exponenciais ideais, levou a uma série de estimativas de condições ótimas para uma inteligibilidade da palavra ideal. Assim, o estudo concluiu por unanimidade das três métricas consideradas, que um tempo de reverberação de 0,4 s garante uma inteligibilidade da palavra de 100%. Refere ainda que o nível ideal máximo de ruído de fundo em salas de aula deve ser de 38 dB(A).

A *Acoustical Society of America*, como já referido anteriormente neste capítulo, recomenda na publicação *Classroom Acoustics I* [36] que salas de aula típicas de aproximadamente 30 estudantes, possuam tempos de reverberação entre os 0,4 e 0,6 s. Sugere ainda que o nível de ruído de fundo nas salas de aula não deve exceder a curva NC 30 e que se a inteligibilidade da palavra numa sala de aula for inferior a 90% se devem realizar tratamentos acústicos para reduzir a reverberação e melhorar a relação sinal-ruído.

Mikulski *et al.* [60] realizaram um estudo acústico em 110 salas de aulas de 5 escolas primárias típicas em Varsóvia, no qual assumiram inicialmente que a inteligibilidade da palavra em salas de aula deve ser no mínimo correspondente a inteligibilidade *boa*, que na escala subjetiva corresponde a um STI igual ou superior a 0,6. No entanto, referiram que comparativamente aos adultos, as crianças compreendem

significativamente menos o discurso dos professores porque conhecem menos vocabulário, logo assumiram um valor mínimo de STI igual a 0,70.

De acordo com Garcia *et al.* [53] os valores recomendados para o tempo de reverberação em salas de aula com menos de 40 estudantes, volumes inferiores a 210 m³ e condições ocupadas e mobiladas encontram-se entre os 0,45 e 0,60 s. Referem ainda que tempos de reverberação inferiores a 0,3 s podem gerar uma atenuação excessiva dos níveis da palavra no fundo da sala. Portanto, concluem que as diretrizes devem incluir limites superior e inferior para os tempos de reverberação, em vez dos comuns tempos de reverberação máximos permitidos.

Adicionalmente, considera-se importante referir que as diretrizes da OMS [61] recomendam menos de 35 dB(A) de ruído comunitário (ruído emitido por todas as fontes exceto o ruído no local de trabalho industrial), para permitir boas condições de ensino e aprendizagem em salas de aula.

3.4. SÍNTESE DO CAPÍTULO

O conforto acústico na comunicação oral numa sala de aula encontra-se diretamente associado ao controlo da reverberação e do ruído de fundo.

Ao longo do capítulo foi abordada a legislação e normalização de vários países, tipificando uma amostra heterogénea que permite uma leitura abrangente. Mencionaram-se essencialmente países europeus (daqueles que foi possível obter informação) e ainda os EUA no sentido de ser possível comparar o tipo de limitações que cada um destes países aplica no seu território.

Nesse sentido, os quadros 3.12 e 3.14 apresentam sínteses dos valores do tempo de reverberação, em salas de aula do 1.º ciclo do ensino básico, em função dos limites da legislação/normalização de cada país e das recomendações de cada artigo, respetivamente, mencionados no decorrer deste capítulo.

Para efeitos de comparação, o quadro 3.13 apresenta os valores dos tempos de reverberação máximos em salas de aula do 1.º ciclo do ensino básico para dois casos exemplo de salas de aula, com volumes iguais a 150 e 300 m³, respetivamente, em função da legislação/normalização dos países presentes no quadro 3.12.

Através da análise do quadro 3.12 é possível verificar que dos países mencionados, apenas em Portugal e na Bélgica a avaliação do tempo de reverberação é realizada diretamente em função do volume do espaço. No entanto, é importante entender que com o aumento do volume, a fórmula de cálculo do tempo de reverberação de Portugal conduz a valores mais elevados do tempo de reverberação do que a fórmula aplicada na Bélgica. O mesmo se depreende pela análise do quadro 3.13, que para uma sala com 300 m³ apresenta um limite máximo do tempo de reverberação de 1,0 s em Portugal e de 0,9 s na Bélgica, enquanto que para uma sala com 150 m³ tanto Portugal como a Bélgica possuem um limite máximo de tempo de reverberação correspondente a 0,8 s.

Através do quadro 3.13 é também possível verificar que para a sala de aula com 150 m³ de volume, o limite mais elevado para o tempo de reverberação corresponde aos 0,8 s exigidos por Portugal, pela França e pela Bélgica. No entanto, é importante ter em consideração que a Bélgica é o único país que tem como referência uma condição não mobilada (quadro 3.12), portanto, de um modo geral conclui-se que o RRAE em conjunto com o *Arrêté du 25 avril* são as legislações menos exigentes relativamente aos valores limite máximos dos tempos de reverberação, em salas de aula com 150 m³ de volume e para condições mobiladas e desocupadas. Relativamente ao exemplo da sala de aula com 300 m³, verifica-se que a legislação francesa é a menos exigente pois define um limite máximo de 1,2 s enquanto que neste caso Portugal apresenta um limite mais restrito de 1,0 s (quadro 3.13).

Quadro 3.12 - Síntese dos valores limite do tempo de reverberação em salas de aula do ensino básico, para cada país referido ao longo deste capítulo

País Legislação/normalização	Ano	Requisitos do T (s)	Condição	Detalhes do T
Portugal RRAE [30]	2008	$\leq 0,15 \times V^{1/3}$ Ex.: $V = 150 \text{ m}^3: \leq 0,8$	Mobilada Desocupada	Média 500-1k-2k Hz Incerteza: - 25% do limite regulamentar
Reino Unido BB93 [33]	2015	$\leq 0,6$	Mobilada Desocupada	Média 500-1k-2k Hz
EUA ANSI/ASA S12.60/Part 1 [38]	2010	$V \leq 283 \text{ m}^3: \leq 0,6$ $283 < V \leq 566: \leq 0,7$	Mobilada Desocupada	Média 500-1k-2k Hz
Espanha DB-HR [43]	2009	$V \leq 350 \text{ m}^3: \leq 0,5$ $V \leq 350 \text{ m}^3: \leq 0,7 (*)$	Mobilada Desocupada	Média 500-1k-2k Hz (* Sem mobiliário e desocupada)
França <i>Arrêté du 25 avril</i> [46]	2003	$V \leq 250 \text{ m}^3: 0,4 \leq T \leq 0,8$ $V > 250 \text{ m}^3: 0,6 \leq T \leq 1,2$	Mobilada Desocupada	Média 500-1k-2k Hz
Polónia PN-B-02151-4 [47]	2015	$V \leq 250 \text{ m}^3: \leq 0,6$ $250 < V \leq 500: \leq 0,8$ $500 < V \leq 2\,000: \leq 1,0$	Mobilada Desocupada	Para cada banda de 1/1 oitava dos 250 aos 8k Hz Tolerância nos 125 Hz: + 30% do valor apresentado
Bélgica NBN S 01-400-2 [51]	2012	$\leq 0,35 \times \log(1,25 \times V)$ Ex.: $V = 150 \text{ m}^3: \leq 0,8$	Ñ mobilada Desocupada	Média 500-1k-2k Hz
Noruega NS 8175 [52]	2012	$\leq 0,5$ (Classe C)	Mobilada Desocupada	Para cada banda de 1/1 oitava dos 125 aos 4k Hz Tolerância nos 125 Hz: + 30%

V = Volume interior (m^3).

No que diz respeito aos valores mais restritivos, o Reino Unido, os Estados Unidos da América e a Polónia apresentam um limite máximo de tempo de reverberação de 0,6 s para a sala com 150 m^3 , enquanto que a Espanha e a Noruega, quer para a sala de aula de 150 m^3 como para a de 300 m^3 , são ainda mais limitativas, pois consideram um valor máximo de tempo de reverberação de 0,5 s (quadro 3.13).

Considera-se ainda importante realçar, que dos países estudados neste capítulo, a França é o único, onde a legislação para além do limite máximo do tempo de reverberação também refere um limite mínimo de 0,4 e de 0,6 s para as salas de aula com 150 e com 300 m^3 , respetivamente (quadro 3.12).

No quadro 3.14 expõem-se os intervalos que os autores referidos mencionam como sendo os valores ideais para os tempos de reverberação em salas de aula. É possível verificar que a generalidade dos valores do quadro 3.14 são mais restritivos do que os valores presentes no quadro 3.12, uma vez que as legislações/normalizações apenas impõem um limite máximo, que não corresponde à melhor solução, mas sim ao limite aceitável.

Quadro 3.13 - Valores dos tempos de reverberação máximos (s) de dois casos exemplo de salas de aula, de acordo com a legislação de cada país referido ao longo deste capítulo

País	Sala com V = 150 m ³	Sala com V = 300 m ³
Portugal	0,8	1,0
Reino Unido	0,6	0,6
EUA	0,6	0,7
Espanha	0,5	0,5
França	0,8	1,2
Polónia	0,6	0,8
Bélgica	0,8	0,9
Noruega	0,5 (Classe C)	0,5 (Classe C)

V = Volume interior (m³).

Contrariamente ao que se verificou no quadro 3.12, em que a legislação francesa era a única que limitava superiormente e inferiormente o tempo de reverberação, os valores ideais do tempo de reverberação em salas de aula presentes no quadro 3.14, indicam que deve existir um intervalo ótimo em vez de um limite máximo. Garcia *et al.* [53] salientam inclusivamente a importância de um limite inferior para além dos usuais limites máximos para o tempo de reverberação, com o objetivo de não permitir a excessiva atenuação dos níveis da palavra no fundo da sala (quadro 3.14).

Quadro 3.14 - Síntese dos valores ideais do tempo de reverberação em salas de aula, para cada estudo referido ao longo deste capítulo

Estudo	Autores	Ano	T (s)	Condição	Observações
<i>Speech Intelligibility Studies in Classrooms</i> [58]	J. Bradley	1986	entre 0,4 e 0,5	Mobilada Ocupada	Para V entre 253 e 529 m ³
<i>Optimum Acoustical Conditions for Speech Intelligibility in Classrooms</i> [59]	S. Bistafa J. Bradley	2000	0,4	-	Para V de 100, 300 e 500 m ³ e uma inteligibilidade de 100%
<i>Classroom Acoustics I</i> [36]	<i>Acoustical Society of America</i>	2000	entre 0,4 e 0,6	Mobilada Desocupada	Para salas de aula típicas de 30 estudantes
<i>Classroom Acoustics Design for Speakers' Comfort and Speech Intelligibility</i> [53]	D. Garcia B. Rasmussen J. Brunskog	2014	entre 0,45 e 0,6	Mobilada Ocupada	Para salas de aula com menos de 40 estudantes, V ≤ 210 m ³ e T superior a 0,3 s para evitar a excessiva atenuação dos níveis da palavra no fundo da sala

V = Volume interior (m³).

Nesse sentido, e porque o desafio acústico de projetar uma sala de aula agradável está em não tornar o tempo de reverberação nem muito longo (para evitar o eco e o mascaramento dos sons diretos) nem muito curto (para evitar o excessivo amortecimento do som), considerou-se que o $T_{\text{médio}}$ (500 - 2k Hz) recomendável para salas de aula do 1.º ciclo do ensino básico, em condições mobiladas e desocupadas, onde o diálogo, a exposição de conteúdos e a leitura são dinâmicas fundamentais, deve estar compreendido entre 0,4 e 0,6 s.

No quadro 3.15 apresentam-se sínteses dos valores do ruído de fundo em salas de aula do 1.º ciclo do ensino básico, em função dos limites da legislação/normalização de cada país e das recomendações de cada artigo, respetivamente, mencionados no decorrer deste capítulo.

Quadro 3.15 - Síntese dos valores limite do ruído de fundo em salas de aula do ensino básico, para cada país referido ao longo deste capítulo

País Legislação/normalização	Ano	Ruído de fundo máximo em salas de aula	Observações
Portugal RRAE [30]	2008	Funcionamento intermitente: $L_{Ar,nT} \leq 40$ dB Funcionamento contínuo: $L_{Ar,nT} \leq 35$ dB	$L_{Ar,nT}$: nível de avaliação do ruído particular de equipamentos do edifício Incerteza: -3 dB(A)
Reino Unido BB93 [33]	2015	$L_{Aeq,30min} \leq 35$ dB	$L_{Aeq,30min}$: nível sonoro contínuo equivalente do ruído de fundo para um período de 30 minutos
EUA ANSI/ASA S12.60/Part 1 [38]	2010	$V \leq 566$ m ³ : $L_{Aeq,60min} \leq 35$ dB $V > 566$ m ³ : $L_{Aeq,60min} \leq 40$ dB	$L_{Aeq,60min}$: nível sonoro contínuo equivalente do ruído de fundo para um período de 60 minutos
Espanha <i>Real decreto 1367</i> [44]	2007	$L_d \leq 40$ dB(A) $L_e \leq 40$ dB(A) $L_n \leq 40$ dB(A)	L_d , L_e e L_n : níveis sonoros para horário diurno, ao entardecer e noturno, respetivamente
França <i>Arrêté du 25 avril</i> [46]	2003	Funcionamento intermitente: $L_{nAT} \leq 43$ dB Funcionamento contínuo: $L_{nAT} \leq 38$ dB	L_{nAT} : nível de pressão sonora normalizada gerado pelos equipamentos do edifício
Polónia PN-B-02151-02 [50]	1987	$L_{Aeq} \leq 40$ dB	L_{Aeq} : nível sonoro contínuo equivalente de todas as fontes de ruído juntas
Bélgica NBN S 01-400-2 [51]	2012	$L_{Aeq,nT,stat} \leq 35$ dB	$L_{Aeq,nT,stat}$: nível sonoro percebido na sala quando as instalações operam simultaneamente Requisito aumentado: 4 dB mais rigoroso
Noruega NS 8175 [52]	2012	$L_{p,A,T} \leq 28$ dB (Classe C)	$L_{p,A,T}$: nível de ruído de fundo médio

V = Volume interior (m³).

O país mais restritivo é a Noruega, que impõe um limite máximo para o ruído de fundo de 28 dB(A). Relativamente aos países menos exigentes, os valores menos restritivos correspondem aos da Espanha e Polónia, com um limite máximo de 40 dB(A) e da França, que apresenta um limite superior de 38 dB(A), apenas para o ruído de equipamentos. Portugal apresenta um limite máximo de 40 dB(A) para o ruído proveniente apenas de equipamentos na condição de funcionamento intermitente e ainda permite associar ao limite máximo uma incerteza.

É ainda importante salientar, que pela observação do quadro 3.15, verifica-se que os parâmetros utilizados para limitar superiormente o ruído de fundo nos países referidos são diversos e apresentam condições muito díspares, o que dificulta a comparação.

No que concerne aos valores ideais do ruído de fundo apresentados no quadro 3.16 verifica-se que, analogamente ao que aconteceu com os tempos de reverberação, também os estudos apresentam na generalidade valores mais exigentes do que os limites máximos apresentados pelas legislações e normalizações do quadro 3.15, sem considerar com os 28 dB(A) exigidos pela Noruega, que apresenta o limite máximo do ruído de fundo mais exigente da bibliografia estudada neste capítulo.

Quadro 3.16 - Síntese dos valores ideais do ruído de fundo em salas de aula, para cada estudo referido ao longo deste capítulo

Estudo	Autores	Ano	Ruído de fundo
<i>Speech Intelligibility Studies in Classrooms</i> [58]	J. Bradley	1986	≤ 30 dB(A)
<i>Optimum Acoustical Conditions for Speech Intelligibility in Classrooms</i> [59]	S. Bistafa J. Bradley	2000	≤ 38 dB(A)
<i>Classroom Acoustics I</i> [36]	<i>Acoustical Society of America</i>	2000	≤ NC30
<i>Dados e estatísticas do ruído</i> [61]	Organização Mundial de Saúde	2014	≤ 35 dB(A)

Contrariamente ao tempo de reverberação, em que se definiu um intervalo de valores recomendáveis, no caso do ruído de fundo apenas interessa que este apresente o menor nível sonoro possível, como tal e em função da análise dos valores presentes nos quadros 3.15 e 3.16 esta dissertação sugere um nível sonoro contínuo equivalente máximo de 35 dB(A) para o ruído de fundo de salas de aula do 1.º ciclo do ensino básico.

Relativamente aos parâmetros de medição da inteligibilidade da palavra, os únicos países que referem requisitos são o Reino Unido, que apresenta 0,60 como o valor mínimo para o STI de salas de aula em *open plan spaces*, e a Polónia, que refere o limite inferior de 0,60 para o STI de salas acabadas, mobiliadas e desocupadas, com volumes entre 120 e 2 000 m³.

Mikulski *et al.* [60] indicam um limite mínimo de 0,70 para o STI de salas de aula do 1.º ciclo do ensino básico enquanto que a *Acoustical Society of America* [36] sugere que a inteligibilidade da palavra numa sala de aula deve ser superior a 90%. A *Acoustical Society of America* também alerta para que 75% de inteligibilidade da palavra significa que estudantes com audição considerada normal apenas conseguem entender 75% das palavras faladas e faz ainda uma analogia entre a inteligibilidade de 75% e a hipotética situação de se estar a ler um livro em que a quarta palavra é sempre inexistente.

De acordo com a classificação presente no quadro 2.8 desta dissertação, apenas a partir de 0,75 é que a inteligibilidade da palavra é *excelente*, ou seja, o ouvinte consegue ouvir as palavras sem qualquer esforço, como tal e considerando toda a bibliografia apresentada, considera-se recomendável para salas de aula do 1.º ciclo do ensino básico que o limite mínimo do parâmetro RASTI seja de 0,75 (ou classificação semelhante noutro parâmetro avaliador da inteligibilidade da palavra).

4

REABILITAÇÃO DE ESCOLAS EM PORTUGAL

4.1. INTRODUÇÃO

No presente capítulo apresenta-se a tipologia das escolas portuguesas do 1.º ciclo do ensino básico, dimensões e/ou métodos construtivos análogos e, em particular, as condições acústicas existentes.

Após uma abordagem ao parque escolar português, estudaram-se as soluções tipicamente utilizadas na reabilitação de salas de aula em Portugal e também se analisaram artigos onde se estudaram as propriedades acústicas de diferentes materiais de desperdício, de forma a demonstrar que é possível encontrar soluções económicas e competitivas, face às soluções utilizadas tradicionalmente na reabilitação acústica em Portugal.

4.2. PARQUE ESCOLAR PORTUGUÊS

Em 1911, pouco depois da implantação da República, Portugal apresentava uma taxa de analfabetismo de 69%. Em 1930 a taxa de analfabetismo baixou para 60%, em 1950 para 42% e em 1991 apenas 11% da população portuguesa era analfabeta [62].

Assim, em 1926, no final do primeiro período republicano português, Portugal apresentava ainda um reduzido número de população alfabetizada o que perspetiva um reduzido número de estudantes e uma rede escolar insuficiente.

Em 1933 nasceu o Estado Novo, que procurou manter o interesse pela educação e em 1940, o artigo 7º da lei do orçamento geral do estado para o ano de 1941 (lei n.º 1985/40 de 17 de dezembro) tornou oficial um programa ambicioso de construção de escolas primárias, o Plano dos Centenários [63].

Este Plano, constituído entre 1941 e 1974, tinha por ambição que o ensino primário abrangesse todo o território nacional, distribuído por todos os distritos do país, incluindo as ilhas. Numa primeira fase, o Plano dos Centenários previa a construção de 561 edifícios, com 1250 salas de aula, e perspetivava manter esse ritmo de construção por cerca de 10 anos, até se concluírem cerca de 11 458 salas de aula, que correspondiam a 6 809 edifícios [64].

As figuras 4.1, 4.2 e 4.3 apresentam escolas cujos projetos da Direção dos Edifícios Nacionais no Norte foram da autoria do arquiteto Manuel Fernandes de Sá, em 1944, no âmbito do Plano dos Centenários. Todos os edifícios projetados no âmbito do Plano dos Centenários possuíam a mesma planta e os seus alçados eram elaborados por forma a marcar pequenas características das regiões em que se encontravam inseridos. Estavam previstos projetos para 1, 2, 3 e 4 salas de aula, para rapazes ou raparigas, ou para ambos, e as soluções eram estudadas de maneira a facilitar obras de ampliação, caso no futuro se justificassem [64].



Figura 4.1 - Escola de Milhões (Bragança); Edifício de 1 sala, Tipo Xisto; Arquivo Direção-Geral do Equipamento Escolar [64]



Figura 4.2 - Escola masculina de Terroso (São Salvador, Póvoa de Varzim); Edifício de 2 salas, simples. Tipo Douro Granito; Arquivo Direcção-Geral do Equipamento Escolar [64]



Figura 4.3 - Escola masculina n.º 3 de Vila do Conde; Edifício escolar de 4 salas simples, tipo Douro Granito; Arquivo Direcção-Geral do Equipamento Escolar [64]

A definição do atual sistema educativo inicia-se em 1986 com a Lei de Bases do Sistema Educativo (aprovada pela lei n.º 46/86, de 14 de outubro). Esta representa a primeira tentativa de transformação das características do modelo de rede escolar pública do 1.º ciclo edificado em Portugal, após o Plano dos Centenários [63]. Apesar das mudanças introduzidas no sistema de ensino com a aprovação da Lei de Bases do Sistema Educativo que, em particular, consagrou a escolaridade obrigatória de nove anos, a rede de escolas públicas do primeiro ciclo, construída entre as décadas de 1940 e 1960 manteve-se praticamente inalterada ao longo dos anos.

Uma vez que já existiam infraestruturas para as escolas do 1.º ciclo do ensino básico, o investimento foi orientado para a construção de edifícios do 2.º e 3.º ciclos, construção de pavilhões desportivos, de bibliotecas e de jardins de infância [65].

Nos finais da década de 1990, com o passar dos anos e as transformações demográficas que se sucederam em Portugal, a densa rede de escolas do 1.º ciclo do ensino básico encontrava-se, no geral, em situação de grande abandono, desajustada face às novas exigências, com número reduzido de estudantes e num estado geral de isolamento e degradação.

Alguns anos depois, o decreto-lei 7/2003, de 15 de janeiro, tornou obrigatória a elaboração da Carta Educativa, pelas Câmaras Municipais. A Carta Educativa procura responder à adequação da oferta e da procura e funciona como um instrumento legitimador e acelerador da reorganização da rede em cada um dos municípios, ao "encontrar soluções educativas locais no contexto político nacional" [63].

Encontrando-se os municípios habilitados para definir soluções, era agora necessária a disponibilização de apoios específicos para a requalificação ou construção de novas escolas. Com esse objetivo, o Quadro de Referência Estratégico Nacional (QREN 2007-2013) mobilizou fundos para a criação do Programa Nacional de Requalificação da Rede do 1.º Ciclo do Ensino Básico e da Educação Pré-escolar (figura 4.4). Este Programa, denominado como Centro Escolar, "visa garantir a igualdade de oportunidade de acesso a espaços educativos de dimensão e recursos adequados ao sucesso educativo" [66].

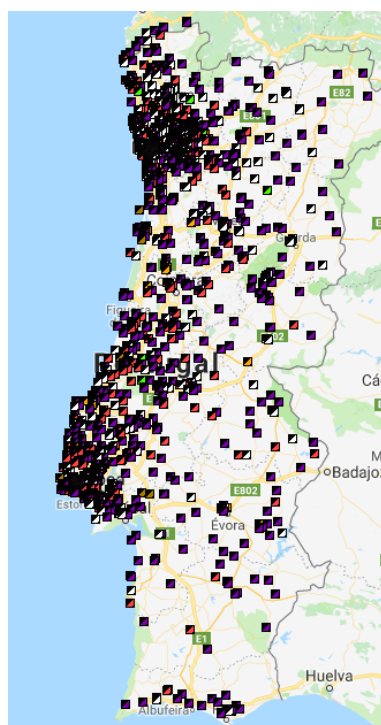


Figura 4.4 - Mapeamento dos 1829 estabelecimentos de ensino aprovados pelo Programa Nacional de Requalificação da Rede do 1.º Ciclo do Ensino Básico e da Educação Pré-escolar em 2018 [66]

É importante salvaguardar que ainda existem estabelecimentos de ensino que não foram abrangidos pelo Programa Nacional de Requalificação da Rede do 1.º Ciclo do Ensino Básico e da Educação Pré-escolar e como tal, a curto médio prazo, estes também terão de ser alvo de intervenções.

Enquanto que durante o período de expansão existia um modelo de planeamento centralizado, que se direcionava para o aumento do número de estabelecimentos e de vagas, atualmente predomina um modelo de planeamento de gestão local orientado por padrões de qualidade e modernização, ainda que com forte regulação estatal ([63] *apud* [67]).

Como consequência desta transformação, a rede escolar pública do 1.º ciclo do ensino básico em Portugal apresenta-se atualmente menos dispersa, mais requalificada e modernizada, é composta por novas escolas e tipologias e organiza-se em agrupamentos de escolas [63].

O quadro 4.1 representa a evolução do parque escolar português destinado ao 1.º ciclo do ensino básico de 2000 a 2016.

Quadro 4.1 - Número de estabelecimentos de ensino que ministram o 1.º ciclo do ensino básico, por ano letivo e por natureza do estabelecimento de ensino, em Portugal (adaptado de [68])

Ciclo e natureza	Ano letivo				Variação em 15 anos
	2000/01	2005/06	2010/11	2015/16	
Total	9 416	8 234	5 221	4 314	-5 102
1.º Ciclo					
Público	8 847	7 711	4 665	3 796	-5 051
Privado	569	523	556	518	-51

Como se pode constatar através do enquadramento histórico realizado acerca da rede escolar pública do 1.º ciclo do ensino básico em Portugal e pela análise do quadro 4.1, o país foi reagindo às suas necessidades ao longo dos anos. O decréscimo significativo no número de estabelecimentos de ensino (cerca de 54% em 15 anos) justifica-se devido à necessária compatibilização da rede escolar com as dinâmicas sociais e com o pensamento educativo atuais.

4.3. MELHORIA DO DESEMPENHO ACÚSTICO NA REABILITAÇÃO DE SALAS DE AULA RECORRENDO A SOLUÇÕES TRADICIONAIS

Entre o momento em que o Estado Novo assumiu o objetivo de desenvolvimento de um grande plano para a concretização da rede escolar do 1.º ciclo do ensino básico - o Plano dos Centenários, em 1940, - e o momento em que o Estado introduziu um instrumento municipal para voltar a equacionar a rede escolar do 1.º ciclo - a Carta Educativa, em 2003, - as características do modelo de planeamento da rede escolar pública do 1.º ciclo em Portugal transformaram-se por completo ([63] *apud* [67]).

Nesse sentido, verifica-se que os edifícios escolares construídos durante o período do Estado Novo apresentam-se atualmente mal conservados ou degradados, dependendo do seu uso ou abandono [69].

Lurdes Lopes [69] escreveu que “os antigos e desativados edifícios escolares do Plano dos Centenários poderão ser reabilitados e adaptados a diversos usos para continuarem a responder às necessidades da população do tecido urbano sedimentado onde se inserem, revitalizando-o e como tal contribuindo para a melhoria da qualidade de vida do mesmo”.

Contactou-se a Direção-Geral de Estatísticas da Educação e Ciência e a Direção-Geral dos Estabelecimentos Escolares no sentido de procurar saber mais informações relativamente ao Programa Nacional de Requalificação da Rede do 1.º Ciclo do Ensino Básico e da Educação Pré-escolar (Centro Escolar). No entanto foi o Instituto de Gestão Financeira da Educação (IGeFE) que confirmou que as informações do *website* Centro Escolar [66] se encontravam atualizadas e que para mais informações seria necessário formalizar por escrito um pedido relativo às informações pretendidas.

Solicitou-se portanto, conhecer quantos foram os estabelecimentos de ensino do 1.º ciclo do ensino básico que foram aprovados no âmbito do programa do Centro Escolar, quantos destes foram efetivamente intervencionados até à data e qual a perspetiva futura de tempo necessário para que seja possível reabilitar/requalificar todos os projetos aprovados. Também se questionou sobre quantos estudantes foram diretamente "afetados" pelos estabelecimentos de ensino intervencionados, e relativamente ao projeto de execução de condicionamento acústico das escolas intervencionadas quais foram as soluções praticadas para a correção acústica interior das salas de aula das escolas do 1.º ciclo do ensino básico.

Não se obteve resposta em tempo útil ao pedido por escrito e a informação sobre o conforto acústico presente na página da internet do Centro Escolar [66] apenas refere que o edifício escolar e os seus elementos de compartimentação devem ser concebidos e dimensionados de forma a que a transmissão sonora entre os locais interiores, em condições normais de utilização, não perturbe as atividades que neles se realizem; que todos os espaços de ensino, incluindo as sala de aulas, devem ser dotados, pelo menos no teto, de revestimentos de absorção sonora e que na escolha dos elementos construtivos e decorativos devem privilegiar-se os que oferecem absorção sonora apropriada.

Dada a falta de informação, optou-se por efetuar uma descrição das soluções de condicionamento acústico adotadas em estudos encontrados.

Gomes *et al.* [70] analisaram em 2004 a reabilitação de um pequeno auditório existente na Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico da Guarda que se revelava inadequado e pouco adaptado às funções para que estaria vocacionado, quer do ponto de vista funcional, quer do ponto de vista acústico.

Para além de uma possível situação de ressonância, não se detetaram ruídos de fundo significativos, tempos de atraso elevados ou ecos flutuantes. Nesse sentido, os autores do estudo [70] estabeleceram as seguintes soluções de intervenção:

- introdução de um teto falso em placas de gesso cartonado, que permite reduzir o volume do auditório (por redução do pé-direito em mais de 1 m) e que funciona simultaneamente como um painel ressonante, confinando um espaço de ar de grande dimensão, no qual foi aplicada uma manta de lã mineral de 80 mm de espessura sobre as placas do teto no sentido de promover a absorção do som no seu interior;
- incremento do número de lugares de 102 para 135;
- colocação de um lambrim decorativo absorvente com cerca de 2,1 m, constituído por painéis de régua de madeira com secção de 55 por 20 mm, com frestas aparentes de 3 mm de largura, confinando uma câmara de ar com espessura superior a 50 mm, preenchida com lã mineral;
- aplicação de painéis ressonantes de contraplacado de madeira, confinando camada de ar preenchida por lã mineral, situados de ambos os lados do estrado;
- colocação de um cortinado pesado franzido absorvente na zona posterior do estrado;
- colocação de pavimento constituído por uma alcatifa assente sobre base de feltro ou borracha.

Nas figuras 4.5 e 4.6 é possível observar as diferenças que se verificaram no pequeno auditório, antes e após a intervenção realizada.



Figura 4.5 - Perspetiva descendente do auditório: (a) antes da intervenção; (b) após a intervenção realizada (adaptado de [70])



Figura 4.6 - Perspetiva ascendente do auditório: (a) antes da intervenção; (b) após a intervenção realizada (adaptado de [70])

Joana Andrade em 2009 [71] conduziu um estudo no qual expõe possíveis soluções de reabilitação para melhorar a qualidade acústica de salas de aula tradicionais portuguesas, vocacionadas à aprendizagem de crianças entre os 6 e os 14 anos. Esclarece que estas salas de aula tradicionais são normalmente constituídas por paredes em alvenaria de pedra com caixilharia, estores e revestimento de piso em madeira. Refere ainda, que algumas salas possuem uma elevação na zona do professor (estrado), o que apresenta como um fator positivo à propagação das ondas sonoras para os estudantes.

Para melhorar a qualidade acústica das salas de aula, que se enquadram na tipologia descrita anteriormente, Joana Andrade [71] sugere a:

- adoção de absorvedores suspensos (*baffles*) no caso de pés direitos muito elevados, por ser uma solução económica pelo facto de não ser necessária intervenção na iluminação;

- opção por janelas com caixilharia em alumínio e vidro duplo, com reaproveitamento das janelas existentes para janelas ou portadas interiores;
- colocação de batente duplo nas portas e material resiliente vedante, como borracha, nas portas e janelas;
- colocação de material absorvente na parte superior das paredes e/ou no teto em função da dimensão da sala, isto é, quanto maior a dimensão mais área absorvente é necessária.

Em 2010 Maria Menezes [72] estudou a reabilitação da Escola Secundária Rodrigues de Freitas, no Porto, que começou a ser construída em 1927, foi ocupada em 1933 e posteriormente foi ampliada em 1950.

Antes da reabilitação, o espaço escolar encontrava-se degradado, devido à falta de manutenção, e com um elevado subaproveitamento das suas instalações, devido à diminuição do número de alunos que se verificava desde a década de 1990.

As soluções construtivas implementadas na reabilitação das salas de aula da Escola Secundária Rodrigues de Freitas, no âmbito do projeto de execução de condicionamento acústico, correspondem:

- à implementação de caixilharias duplas constituídas pela caixilharia existente, devidamente recuperada com vidro laminado, uma caixa-de-ar de aproximadamente 22 cm e uma caixilharia em perfis de ferro, com vidro duplo laminado e com caixa-de-ar de 6 mm;
- ao tratamento dos orifícios para admissão de ar existentes na fachada através da colocação de lã de rocha com 3 cm de espessura e com 40 kg/m^3 de massa volúmica, um véu negro em fibra de vidro e uma chapa perfurada com 20% de taxa mínima de perfuração ou uma rede metálica distendida;
- à aplicação de borrachas de vedação em todo o perímetro da porta e janelas;
- à aplicação de um teto falso em gesso cartonado perfurado para controlo da reverberação, com uma caixa-de-ar de 20 cm, parcialmente preenchida com placas de lã de rocha de 40 mm de espessura e 40 kg/m^3 de massa volúmica (figura 4.7);
- à colocação de soalho em réguas de madeira como revestimento de piso;
- à utilização de atenuadores sonoros nas condutas de ventilação entre os ventiladores e as salas de aula, revestimento exterior das condutas, atenuadores sonoros na insuflação e extração das unidades de tratamento de ar e condutas flexíveis com revestimento absorvente no interior nas fases terminais de ligação às salas de aula ou outros espaços.

O projeto de condicionamento acústico referente à reabilitação da Escola Secundária Rodrigues de Freitas não considerou qualquer tipo de reforço acústico nas paredes de separação entre salas de aula ou entre salas de aula e outros espaços, pois estas são constituídas por cerca de 30 cm de alvenaria de granito rebocada e, como tal, apresentam um elevado isolamento sonoro [72].

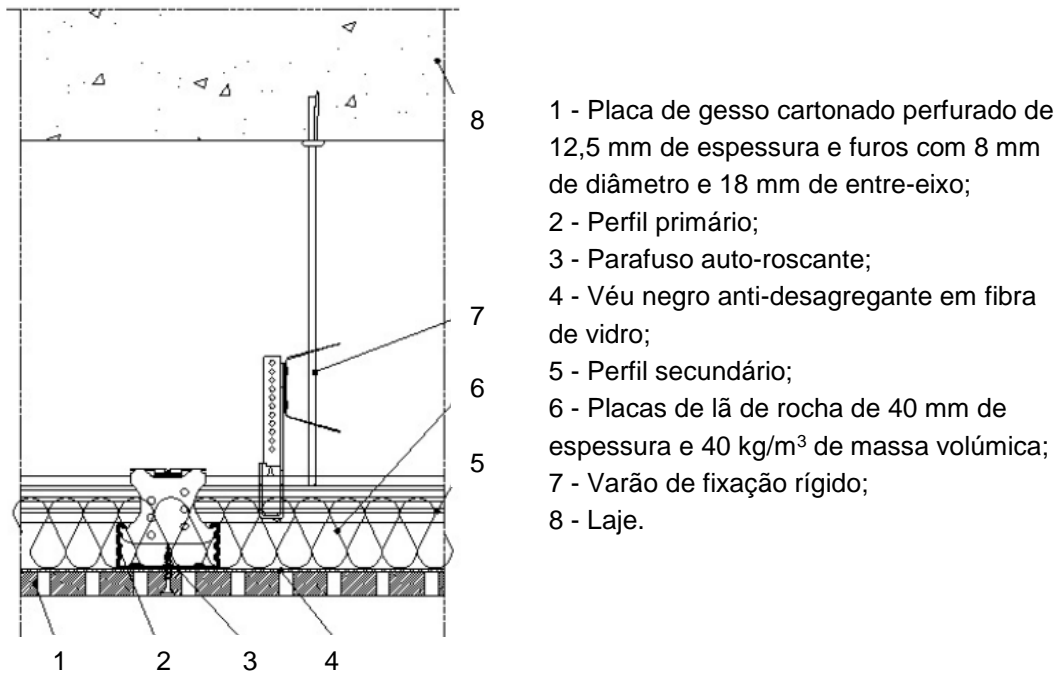


Figura 4.7 - Pormenor do teto das salas de aula e dos corredores dos pisos 1 e 0 da Escola Secundária Rodrigues de Freitas (sem escala, adaptado de [72])

4.4. MELHORIA DO DESEMPENHO ACÚSTICO NA REABILITAÇÃO DE SALAS DE AULA RECORRENDO A MATERIAIS DE DESPERDÍCIO

Com a diminuição dos recursos naturais devido à grande expansão da população mundial e os elevados preços praticados pelos comerciantes de materiais absorventes sonoros, o presente trabalho propõe uma abordagem diferente das tradicionais soluções de condicionamento acústico adotadas na reabilitação de edifícios em Portugal.

A estrutura dos materiais de absorção sonora normalmente utilizados, segundo Buratti *et al.* [73], tem por base meios sintéticos porosos como é o caso da lã de rocha, lã de vidro, poliuretano e poliéster. No entanto, estes materiais possuem processos de produção caros, elevado consumo de energia e alto impacto ambiental. Assim, os materiais reciclados estão a tornar-se uma alternativa interessante, devido ao seu bom comportamento acústico, semelhante ao dos materiais porosos tradicionais, e ao baixo impacto dos custos de produção, graças ao uso de resíduos derivados de outros ciclos de produção.

A crescente preocupação pública com os efeitos negativos da poluição, leva os consumidores a privilegiar os produtos reciclados em detrimento dos produtos convencionais de isolamento e absorção sonora. Nesse sentido, é necessário aprofundar o estudo relativo aos materiais absorventes de som, feitos de materiais reciclados e excedentes, que podem funcionar como alternativas viáveis aos recursos convencionais, para aplicações atuais e futuras.

Alguns autores já apresentaram estudos sobre possíveis competidores para os produtos convencionais de isolamento e absorção acústica como os que são apresentados de seguida.

Rey *et al.* [74] referem a necessidade de criar novos materiais acústicos absorventes com fibras provenientes da reciclagem, uma vez que a lã de poliéster é feita com petróleo, que dado o atual panorama mundial implica um aumento dos preços praticados.

Como tal, apresentaram uma nova lã de poliéster obtida através da reciclagem de garrafas de plástico produzidas com base na matéria-prima PET (polietileno tereftalato).

Na figura 4.8 pode observar-se uma amostra dos pedaços de copos de plástico PET reciclados e no quadro 4.2 apresentam-se os valores dos coeficientes de absorção sonora obtidos na câmara de reverberação.



Figura 4.8 - Pedaços de copos de plástico PET (polietileno tereftalato), antes do processo de fabrico (adaptado de [74])

Quadro 4.2 - Valores dos coeficientes de absorção sonora (α_s) da lã de poliéster reciclada, obtidos através dos ensaios realizados em câmara reverberante (adaptado de [74])

Amostra	Espessura (mm)	Massa superficial (g/m ²)	α_s em função da frequência (Hz)				
			250	500	1 000	2 000	4 000
1400-4	40	1 400	0,43	0,57	0,77	0,69	0,62
1200-2	20	1 200	0,32	0,55	0,69	0,70	0,61
1000-4	40	1 000	0,37	0,55	0,73	0,68	0,62
800-4	40	800	0,22	0,43	0,55	0,63	0,57
500-2	20	500	0,21	0,34	0,43	0,55	0,55
400-4	40	400	0,21	0,35	0,43	0,53	0,53

Com este estudo concluiu-se que estes novos materiais, fabricados utilizando exatamente a mesma máquina e seguindo o mesmo processo da lã de poliéster, apresentam características de um material acústico absorvente, com coeficientes de absorção sonora que aumentam com a frequência (figura 4.9) [74].

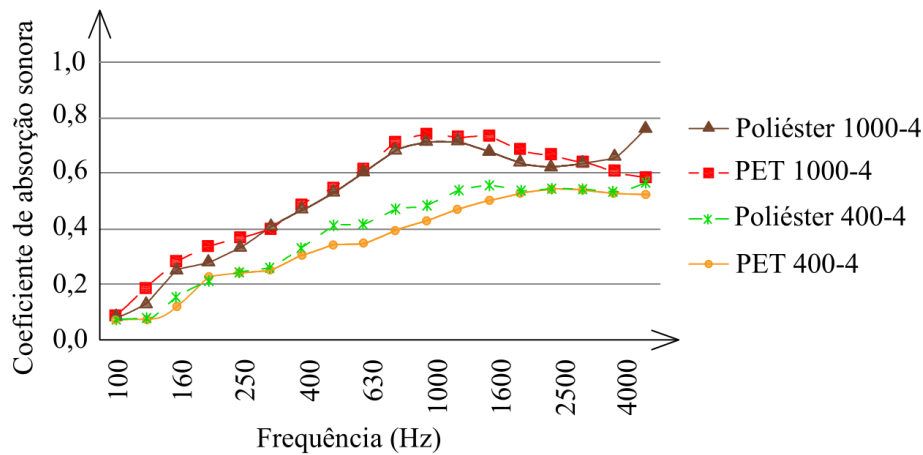


Figura 4.9 - Coeficientes de absorção sonora obtidos para a lã de poliéster pura e para a lã de poliéster obtida a partir da reciclagem de garrafas de plástico PET (polietileno tereftalato) (adaptado de [74])

Rey *et al.* [75] estudaram as propriedades de absorção sonora de diferentes materiais desenvolvidos a partir de resíduos de espuma de poliuretano. Os resíduos de espuma de poliuretano são provenientes da indústria têxtil e são comumente utilizados no fabrico de carpetes, palmilhas, materiais de embalagens, entre outros. É importante que a espuma de poliuretano seja reciclada, uma vez que o seu descarte se está a tornar cada vez mais num grave problema ambiental.

Neste estudo foram elaboradas seis amostras a partir de resíduos de espuma de poliuretano triturado com diferentes composições internas. O único parâmetro controlado pela fábrica têxtil corresponde à massa volúmica de cada amostra, que variou entre os 61,4 e os 224,6 kg/m³. No quadro 4.3 apresentam-se os valores dos coeficientes de absorção sonora de incidência normal obtidos pelo estudo [75], para a faixa de frequências entre os 500 e os 2 000 Hz.

Quadro 4.3 - Valores dos coeficientes de absorção sonora das amostras de espuma de poliuretano reciclada, obtidos através dos ensaios realizados em incidência normal (adaptado de [75])

Amostra	Espessura (mm)	Massa volúmica (kg/m ³)	Coeficiente de absorção sonora em função da frequência (Hz)		
			500	1 000	2 000
D60	32,0	61,4	0,23	0,61	0,96
D80	31,0	85,9	0,29	0,78	1,00
D120	31,0	135,1	0,38	0,81	0,90
D150	31,5	174,1	0,46	0,69	0,78
D180	32,3	211,3	0,43	0,64	0,70
D200	31,2	224,6	0,41	0,59	0,68

Embora as amostras utilizadas para os ensaios experimentais provenham de diferentes resíduos de espuma, os resultados dos coeficientes de absorção sonora são muito semelhantes. Pelos resultados obtidos, o artigo [75] conclui que espuma de poliuretano reciclada apresenta boa absorção sonora e pode ser uma alternativa viável aos materiais convencionais utilizados.

Vieira [76] caracterizou acusticamente suportes alveolares de armazenamento e transporte de géneros alimentares. As amostras ensaiadas correspondem a caixas e tabuleiros de transporte e armazenamento de ovos e fruta constituídas por “papel”, celulose moldada, e por “plástico”, polipropileno nos tabuleiros de fruta e poliestireno nas caixas de ovos. É importante distinguir que suportes alveolares para ovos não têm como função isolar acusticamente um espaço, mas sim a sua correção acústica, pela redução do tempo de reverberação e difusão do som aí produzido. No quadro 4.4 apresentam-se os resultados obtidos relativamente aos coeficientes de absorção sonora das amostras ensaiadas em câmara reverberante.

Quadro 4.4 - Coeficientes de absorção sonora obtidos através dos ensaios em câmara reverberante (α_s) e coeficiente de absorção sonora ponderado (α_w) das amostras referidas (T - tabuleiro, C - caixa, A - com pequenas Aberturas, a - aberta, f - fechada, F - fruta, n - superfície normal exposta ao som, i - superfície inversa exposta ao som e P - plástico) (adaptado de [76])

Amostra	α_s em função da frequência (Hz)					α_w
	250	500	1 000	2 000	4 000	
T20A-n	0,03	0,10	0,57	0,47	0,52	0,20 (H)
T20A-i	0,02	0,13	0,69	0,52	0,60	0,20 (H)
T30A-n	0,01	0,09	0,52	0,52	0,52	0,20 (H)
T30A-i	0,05	0,13	0,69	0,52	0,60	0,20 (H)
T30-n	0,05	0,23	0,66	0,43	0,53	0,30 (H)
T30-i	0,03	0,24	0,69	0,47	0,63	0,30 (H)
C12A-a-n	0,01	0,11	0,64	0,57	0,45	0,20 (M)
C12A-a-i	0,06	0,28	0,53	0,64	0,54	0,30 (H)
C12A-f-n	0,29	1,09	0,62	0,39	0,38	0,45 (L)
C12A-f-i	0,28	1,13 (*)	0,61	0,76	0,54	0,65 (L)
C12-a-n	0,04	0,11	0,59	0,62	0,44	0,20 (M)
C12-a-i	0,04	0,17	0,69	0,61	0,58	0,25 (H)
C12-f-n	0,13	0,55	0,74	0,47	0,58	0,40 (M)
TF39-n	0,02	0,05	0,35	0,44	0,39	0,10 (H)
TF39-i	0,04	0,11	0,67	0,37	0,45	0,20 (M)
CP12-a-n	0,01	0,07	0,39	0,31	0,48	0,15 (H)
CP12-a-i	0,03	0,14	0,52	0,36	0,45	0,20 (H)
TPF24-n	0,05	0,18	0,26	0,63	0,34	0,25 (M)
TPF24-i	0,08	0,25	0,34	0,74	0,47	0,25 (M)

(*) valor superior a 1, mas é o que consta em [76].

É importante referir que os coeficientes de absorção sonora de cada elemento quando as amostras são ensaiadas pela superfície de exposição “normal”, são piores relativamente aos resultados das amostras ensaiadas pela superfície de exposição “inversa” [76].

Em relação aos valores do coeficiente de absorção sonora ponderado (α_w), a autora concluiu que variam entre os 0,10 e 0,65, sendo que os melhores resultados correspondem à amostra C12A-f-i (caixas para 12 ovos, com pequenas aberturas, fechadas e expostas ao som pela superfície inversa) e os piores para a amostra TF39-n (tabuleiros de celulose moldada com 39 cavidades, ensaiados com a face normal voltada para cima) [76].

O quadro 4.5 sintetiza as principais conclusões retiradas do estudo de S. Vieira [76].

Quadro 4.5 - Principais conclusões retiradas, comparáveis linha a linha (T - Tabuleiro, C - Caixa, A - com pequenas Aberturas, f - fechada, n - superfície normal exposta ao som e i - superfície inversa exposta ao som) (adaptado de [76])

Melhor	Pior
Tabuleiros sem aberturas	Tabuleiros com aberturas
Tabuleiros de papel para ovos	Tabuleiros de papel para fruta
Tabuleiros de plástico para fruta	Tabuleiros de papel para fruta
Caixas para ovos fechadas	Caixas para ovos abertas
Caixas de papel para ovos abertas ou fechadas	Caixa de plástico para ovos
Caixas para ovos fechadas	Tabuleiros para ovos e para a fruta
Tabuleiro de plástico para fruta	Caixa de plástico para ovos
Amostras expostas pela superfície inversa	Amostras expostas pela superfície normal
Amostra C12A-f-i	Todas as outras amostras

Secchi *et al.* [77] estudaram novos desenhos de absorventes sonoros criados a partir de papelão ondulado, cartão alveolar, tubos de papelão e fibra de celulose já existentes no mercado, com o objetivo de reduzir o impacto ambiental dos materiais normalmente utilizados para a correção acústica de ambientes interiores.

Identificaram os painéis de gesso utilizados frequentemente em tetos falsos como o sistema mais comum para a correção acústica de interiores e caracterizaram o desempenho típico do tradicional teto de gesso disponível no mercado com valores de α_w entre 0,50 e 0,70, uma percentagem de furação variável entre 9% e 18%, diâmetro dos furos entre 6 e 10 mm e espessura da cavidade de 60 a 200 mm, sendo que as cavidades são geralmente preenchidas com materiais absorventes de som com uma espessura de 20 a 80 mm (como lã mineral ou fibra de poliéster) [77].

Apresentaram várias opções de design possíveis, no entanto, apenas realizaram o protótipo do painel *sandwich*, representado na figura 4.10, que é composto por dois painéis alveolares de papelão, tipo favo de mel (15 mm de espessura), cobertos por papel *kraft* (2 mm de espessura), unidos por filme adesivo, perfurado em correspondência com as células do papelão (diâmetro dos furos de 3 mm) e por um painel de fibras de celulose (80 kg/m³ e 40 mm de espessura) [77]. Os resultados da absorção sonora do protótipo do painel de *sandwich* presentes no quadro 4.6 obtiveram-se a partir da amostra de 9 m² ensaiada sobre o pavimento de uma câmara reverberante. Neste caso, o painel de fibra de celulose foi coberto com o painel de favo de mel perfurado apenas no lado acima, uma vez que nesta configuração o lado oposto do painel está contra o chão, o mesmo não aconteceria caso se ensaiasse a amostra como absorvedor suspenso [77].

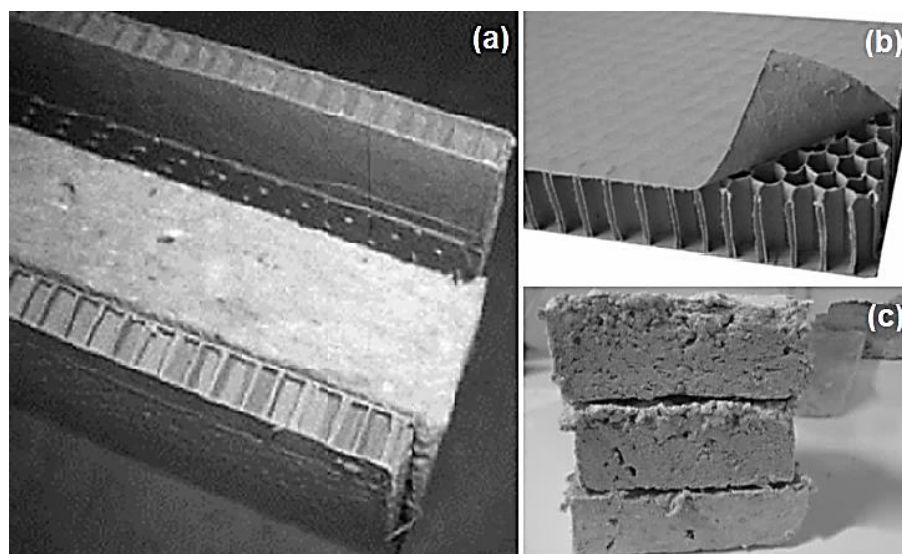


Figura 4.10 - (a) Protótipo do painel *sandwich* testado na câmara reverberante; (b) cartão de favo de mel; (c) painel de fibras de celulose (adaptado de [77])

Quadro 4.6 - Valores dos coeficientes de absorção sonora obtidos a partir do ensaio em câmara reverberante (α_s) do painel de *sandwich*, em função da frequência (adaptado de [77])

Amostra	Espessura (mm)	α_s em função da frequência (Hz)				
		250	500	1 000	2 000	4 000
Painel <i>sandwich</i> como revestimento de parede	78	0,69	1,15 (*)	0,88	0,95	0,41

(*) valor superior a 1, mas é o que consta em [77].

Os resultados do quadro 4.6 mostraram que o coeficiente de absorção sonora do protótipo utilizado como revestimento de parede apresenta valores próximos da unidade entre os 500 e os 2 000 Hz. Como tal, os autores do artigo [77] concluíram que a solução proposta é competitiva em comparação com outros materiais tradicionais amplamente utilizados na construção civil (como painéis de gesso, lã de rocha e painéis de lã de vidro) e representa uma oportunidade interessante para a conveniente reciclagem de papel e papelão.

Em 2017 apenas 5% dos calçados velhos eram reciclados e no sentido de modificar esta questão, Yildiz *et al.* [78] avaliaram a hipótese de reciclar e reutilizar as solas dos calçados desperdiçados como painéis absorventes sonoros, em vez de usar materiais absorventes sintéticos.

Todas as solas (geralmente constituídas por borracha, PVC e PU) foram granuladas utilizando um triturador e, para se obter uma mistura homogênea, aos grânulos preparados misturou-se um aglutinante de poliuretano. Após a moldagem, aplicou-se uma pressão de 3 bar à mistura homogênea usando uma prensa hidráulica que estabilizou a mistura sob pressão e, por fim, a cura realizou-se durante 15 minutos num forno a 150 °C [78].

Dado que a quantidade de aglutinante usado nas amostras afeta diretamente as propriedades acústicas das mesmas, os autores do estudo optaram por manter constante a quantidade de ligante em todas as amostras ensaiadas. As características de diferentes composições foram investigadas pela adição de fibras de juta e fibras de vidro, trituradas e adicionadas nas proporções indicadas no quadro 4.7 [78].

No quadro 4.7 apresentam-se as composições das amostras de solas de sapatos recicladas e os respectivos valores dos coeficientes de absorção sonora, obtidos a partir dos ensaios realizados em tubos de ondas estacionárias.

Quadro 4.7 - Composição das amostras de solas de sapatos recicladas e respetivo coeficiente de absorção sonora, em função da frequência (adaptado de [78])

Amostra	Borracha (g)	Aglutinante (g)	Fibra de juta (g)	Fibra de vidro (g)	Coeficiente de absorção sonora em função da frequência (Hz)				
					250	500	1 000	2 000	4 000
R	135	15	-	-	0,03	0,03	0,23	0,93	0,25
J10	120	15	15	-	0,05	0,06	0,56	0,85	0,47
J20	105	15	30	-	0,07	0,09	0,65	0,62	0,53
G10	120	15	-	15	0,03	0,05	0,45	0,97	0,51
G20	105	15	-	30	0,08	0,28	0,55	0,94	0,54

Em função dos resultados do quadro 4.7, os autores do estudo [78] concluíram que as amostras R, G10 e G20 apresentaram as maiores capacidades de absorção na faixa de frequência de 1 000 a 2 000 Hz, a amostra J20 quase não mostrou alterações no valor do coeficiente de absorção sonora entre 1 000 e 4 000 Hz e a amostra G20 apresentou a melhor resposta na faixa dos 500 Hz.

Existem ainda vários estudos, [79], [80] e [81], que ao contrário dos anteriormente referidos ([74], [75], [76], [77] e [78]), fazem uma abordagem mais geral aos materiais de desperdício, sugerindo materiais recicláveis que se antevê que possuam boas propriedades acústicas.

Asdrubali [80] referiu no decorrer da sua pesquisa sobre as propriedades acústicas de novos materiais sustentáveis, que resíduos de borracha, aparas de metal, plásticos, celulose e aglomerados têxteis reciclados podem ser usados como materiais acústicos. Assinala ainda que camadas de borracha reciclada feitas de resíduos de pneus granulados são uma alternativa interessante aos materiais tradicionais, especialmente porque os pneus foram banidos dos aterros sanitários. O autor acrescenta ainda que a mistura de vários materiais reciclados de diferentes granulometrias pode ser útil para se obter o desempenho desejado e que, nesses casos deve-se adicionar um aglutinante ou uma cola na proporção adequada, uma vez que a sua quantidade vai influenciar a absorção sonora do material.

Fesina *et al.* [79] indicaram os enchimentos dos assentos, os materiais presentes na bagageira dos automóveis, os materiais que compõem os compartimentos do motor e os espaços interiores dos automóveis, como possíveis materiais que podem ser reciclados e que devem ser ensaiados para comprovar as suas propriedades acústicas.

A madeira, borracha granulada, plástico triturado e polipropileno triturado são materiais de desperdício referidos por Nedeff *et al.* [81].

Assim, no presente trabalho vão ser estudadas as vantagens da utilização de materiais de desperdício não orgânico na melhoria da qualidade acústica de uma sala de aula, em especial no que se refere aos ruídos de condução aérea.

4.5. SÍNTESE DO CAPÍTULO

Devido às transformações políticas, demográficas e culturais que ocorreram em Portugal com o passar dos anos, uma grande parte da rede escolar pública do 1.º ciclo do ensino básico necessita de ser reabilitada e modernizada para os padrões atuais de conforto.

Nesse sentido, é importante reter deste capítulo que as soluções de condicionamento acústico que estão a ser implementadas nas reabilitações tradicionais em Portugal são geralmente a redução do pé direito através da colocação de teto falso ou de absorvedores suspensos, a colocação de teto falso perfurado em gesso cartonado com caixa-de-ar parcialmente preenchida com placas de lã de rocha, para controlo da reverberação, a adoção de cortinados pesados franzidos absorventes, a aplicação de borrachas de vedação em todo o perímetro da porta e janelas, a aplicação de soalho em réguas de madeira como revestimento de piso e a adoção de janelas de caixilharia dupla em alumínio e vidro duplo.

Numa ótica económica de aproveitamento de materiais de desperdício analisaram-se estudos de diferentes autores, nos quais se demonstrou a existência de características absorventes em produtos reciclados.

Assim, o quadro 4.8 apresenta uma síntese dos valores dos coeficientes de absorção sonora das amostras testadas nos artigos analisados ao longo deste capítulo. Por simplificação, pela observação dos valores correspondentes à banda de frequência central de 1 000 Hz é possível verificar, pelo quadro 4.8, que o material que apresenta melhor coeficiente de absorção sonora é o painel *sandwich*, que engloba cartões de favo de mel com um painel de fibras de celulose, seguido da espuma de poliuretano, enquanto que as solas de sapatos são a amostra que apresenta o menor coeficiente de absorção sonora.

Quadro 4.8 - Síntese dos valores dos coeficientes de absorção sonora correspondentes à melhor amostra de cada estudo de materiais de desperdício, referido no decorrer do capítulo 4

Autores	Ano	Material de desperdício	Amostra	Coeficiente de absorção sonora em função da frequência (Hz)				
				250	500	1 000	2 000	4 000
Rey <i>et al.</i> [74]	2011	Garrafas de plástico PET	1400-4	0,43	0,57	0,77	0,69	0,62
Rey <i>et al.</i> [75]	2012	Espuma de poliuretano	D120	-	0,38	0,81	0,90	-
Vieira [76]	2014	Caixas e tabuleiros de ovos	C12A-f-i	0,28	1,13 (*)	0,61	0,76	0,54
Secchi <i>et al.</i> [77]	2016	Cartões de favo de mel e um painel de fibras de celulose	Painel de <i>sandwich</i>	0,69	1,15 (**)	0,88	0,95	0,41
Yildiz <i>et al.</i> [78]	2017	Solas de sapatos	G20	0,08	0,28	0,55	0,94	0,54

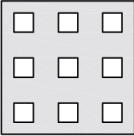
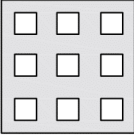
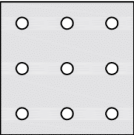
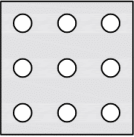
(*) valor superior a 1, mas é o que consta em [76];

(**) valor superior a 1, mas é o que consta em [77].

No sentido de facilitar uma comparação dos coeficientes de absorção sonora das amostras realizadas com recurso a materiais de desperdício, apresentadas no quadro 4.8, com coeficientes de absorção sonora de materiais que são atualmente comercializados, apresentam-se nos quadros 4.9 e 4.10, valores

dos coeficientes de absorção sonora de placas de gesso cartonado laminado com perfurações e de painéis de lã mineral colados sobre base sólida e barrados com massa mineral de forma a obter uma superfície contínua, retirados dos catálogos [82] e [83], respetivamente.

Quadro 4.9 - Valores dos coeficientes de absorção sonora ponderados (α_w) de placas de gesso cartonado laminado com perfurações (adaptado de [82])

Tipo de placa	Desenho de perfurado	% Perfuração	α_w	
			Sem lã mineral	Com lã mineral (6 cm)
Placa <i>PladurFon</i> com bordo quadrado		18,3	0,75	0,85
		23,1	0,75 (L)	0,90
		8,1	0,50 (L)	0,55 (L)
		18,0	0,70 (L)	0,85

Quadro 4.10 - Valores dos coeficientes de absorção sonora, em função da frequência, de painéis de lã mineral com acabamento em massa mineral de forma a obter uma superfície contínua (adaptado de [83])

Material	Aplicação	Espessura painel base (mm)	Frequência (Hz)						NRC
			125	250	500	1k	2k	4k	
<i>BASWAphon</i> <i>BASE</i>	Sobre base sólida	30	0,10	0,32	0,83	0,89	0,73	0,65	0,70
		50	0,19	0,82	0,97	0,87	0,76	0,66	0,85
		70	0,28	0,95	0,98	0,83	0,72	0,61	0,85
	Sob teto falso com caixa de ar (20 cm)	30	0,31	0,48	0,86	0,93	0,80	0,71	0,75
		50	0,41	0,63	0,97	0,93	0,80	0,76	0,85
		70	0,53	0,91	0,96	0,86	0,77	0,67	0,90

Por comparação dos valores do quadro 4.8 com os valores apresentados nos quadros 4.9 e 4.10, é possível observar que as amostras dos materiais de desperdício apresentam, apesar de inferiores, valores que se encontram próximos dos observados nos materiais comercializados. Como tal, de um modo geral conclui-se que a substituição de materiais comercializados por materiais de desperdício pode ser viável, uma vez que é possível encontrar soluções com absorções sonoras semelhantes, com a vantagem dos materiais de desperdício serem mais económicos.

5

METODOLOGIA ADOTADA NO CASO DE ESTUDO

5.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo descreve-se a distribuição dos espaços, os acabamentos, os acessos e a envolvente onde a Escola Básica do 1.º Ciclo de Santiago de Candoso (Guimarães) se encontra inserida. De seguida, referem-se quais os materiais de desperdício selecionados e os motivos para a sua escolha. Por último, descreve-se a metodologia adotada e os equipamentos utilizados nos ensaios realizados, na câmara reverberante e na sala de aula.

5.2. CARACTERIZAÇÃO DA ESCOLA BÁSICA DO 1.º CICLO DE SANTIAGO DE CANDOSO

A Escola Básica do 1.º Ciclo de Santiago de Candoso, contruída em 1966, encerrou em 2013 devido à falta de condições de conforto térmico e acústico.

Em 2014 a *Earthship Biotecture Portugal* [84] e a junta de freguesia de Santiago de Candoso fizeram uma parceria que concedeu a responsabilidade da Escola Básica do 1.º Ciclo de Santiago de Candoso à *Earthship Biotecture Portugal*. Neste sentido, é importante esclarecer que a *Earthship Biotecture* é uma empresa global que se dedica à construção de casas ecológicas e autossuficientes a partir de materiais naturais e reciclados. As casas *earthship*, pensadas pelo arquiteto norte americano Michael Reynolds, são autónomas, construídas com materiais naturais (como madeira e terra) e reciclados (como garrafas, latas e pneus) e são projetadas com o objetivo de produzirem os seus próprios recursos (água, eletricidade e alimentos) através de técnicas passivas [84].

Assim sendo, não estão atualmente a decorrer atividades letivas na Escola Básica do 1.º Ciclo de Santiago de Candoso, mas sim alguns *workshops* organizados pela *Earthship Biotecture Portugal*. Estes *workshops* permitem aos interessados conhecer e experimentar algumas técnicas construtivas a partir de materiais de desperdício e entender melhor os princípios *earthship*, como a utilização de materiais reciclados, o reaproveitamento da água da chuva, o cultivo dos próprios alimentos, a utilização de energias renováveis para produção de eletricidade (sol e vento), o aquecimento e arrefecimento térmico e solar e o tratamento das águas residuais. Estes conceitos vão de encontro ao estudo realizado nesta dissertação e daí a importância de os mencionar.

A Escola Básica do 1.º Ciclo de Santiago de Candoso é um edifício representativo dos projetos das escolas primárias do Plano dos Centenários (1941-1974), assentes na repetição da mesma planta funcional adaptada ao número de salas pretendido. Assim, ao estudo realizado acresce ainda o interesse da possibilidade da sua aplicação em escolas construídas também no âmbito do Plano dos Centenários, de acordo com projetos de base semelhantes.

A escola localiza-se na proximidade da A7 e da N206 e a cerca de 200 m do Hospital da Luz de Guimarães (figura 5.1). A zona em que a escola está inserida é calma, maioritariamente habitacional (figura 5.2) e os acessos (figura 5.3) encontram-se condicionados à reduzida largura da faixa de rodagem em alguns troços.



Figura 5.1 - Mapa da zona onde se encontra inserida a Escola Básica do 1.º Ciclo de Santiago de Candoso (Guimarães) (adaptado de [85])



Figura 5.2 - Envoltório da Escola Básica do 1.º Ciclo de Santiago de Candoso: (a) edifícios habitacionais a Norte; (b) edifícios habitacionais a Este

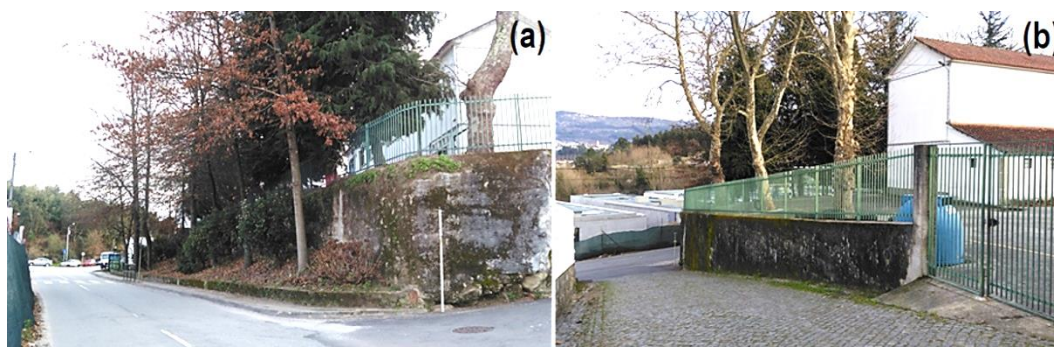


Figura 5.3 - Acessos da Escola Básica do 1.º Ciclo de Santiago de Candoso: (a) entrada pedonal pela Rua dos Vendedores; (b) portão de entrada pela Rua do Messouro

A fachada principal da Escola Básica do 1.º Ciclo de Santiago de Candoso (figura 5.4) está orientada a Este (Nascente) como forma de otimizar o aproveitamento solar e de resguardar o edifício dos ventos mais frios. Este edifício é constituído por dois pisos e dividido em dois módulos completamente simétricos, com total separação de espaços, destinados aos dois sexos, como era habitual à época. Apresenta quatro salas de aula com iguais dimensões, de oito metros de comprimento por seis metros de largura e três metros e meio de pé direito, servidas por grandes janelas de iluminação unilateral.

O acesso ao interior da escola faz-se pelos dois extremos do edifício (figura 5.4). Para cada entrada no rés-do-chão existe um *hall* de distribuição central, com acesso ao piso superior, à sala de aula e ao recreio coberto posterior, com bloco de instalações sanitárias. O 1º andar repete o sistema de distribuição em *hall* para uma sala de aula.



Figura 5.4 - Fachada principal da Escola Básica do 1.º Ciclo de Santiago de Candoso, orientada a Este (Nascente)

A sala de aula disponibilizada para a realização de ensaios no âmbito desta dissertação encontra-se ao nível do piso térreo e na mesma localização, no primeiro piso, existe uma sala idêntica a esta. É ainda importante referir que a sala de aula não possui qualquer tipo de ventilação forçada e que, aquando da realização dos ensaios, estavam a construir um conjunto de moradias à frente da escola (figura 5.5).



Figura 5.5 - Vista panorâmica da Escola Básica do 1.º Ciclo de Santiago de Candoso: (a) sala de aula disponibilizada; (b) construção a decorrer à frente da Escola Básica do 1.º Ciclo de Santiago de Candoso

As paredes exteriores da escola são em alvenaria de pedra e o rodapé exterior e as molduras dos vãos da fachada principal são revestidos por pedras de granito. Todas as paredes, exteriores e interiores, são rebocadas e caiadas a branco. O piso das salas é revestido a soalho de madeira e as caixilharias são de alumínio com vidro duplo (a caixilharia e vidro presentes não são de origem pois foram substituídos devido ao seu estado de degradação).

5.3. MATERIAIS DE DESPÉRDIO SELECIONADOS

Através da bibliografia consultada ao longo do capítulo 4 foi possível enumerar uma lista de materiais de desperdício potencialmente interessantes do ponto de vista da sua absorção sonora, que poderiam ser utilizados para a reabilitação acústica da sala de aula estudada (quadro 5.1).

Quadro 5.1 - Quadro síntese dos possíveis materiais de desperdício com potencial de absorção sonora

Material de desperdício	Utilização/Motivo
Aparas de tecidos	
Aparas de espumas	
Aparas de madeira	Não se utilizou devido à elevada mão de obra necessária para o tempo disponível
Rolos das linhas de costura	
Palhinhas de plástico	
Caixas de ovos	
Embalagens de iogurtes	
Embalagens de leite	
Espuma de assentos de automóveis	Não se utilizou devido à dificuldade na recolha da quantidade de material necessário
Rolos de cozinha de cartão	
Rolos de papel higiénico	
Solas de sapatos	
Alcatifa	
Resíduo têxtil desperdiçado na reciclagem de pneus	Não se utilizou devido à dificuldade de fixação do material
Serrim	
Lençóis pendurados no teto (para diminuir o pé direito da sala)	Não se utilizou porque não haveria termo de comparação entre a influência da diminuição do volume da sala e da absorção sonora do material na redução do tempo de reverberação
Paletes madeira	Não se utilizou devido à elevada massa volúmica da madeira que dificulta a sua fixação
Copos plásticos de café	
Espuma de colchões de retomas	Utilizou-se
Tabuleiros de ovos	

Para selecionar os materiais de desperdício a ensaiar, tiveram-se em conta vários fatores, entre os quais, o tempo disponível para os reunir, a quantidade de material necessária e o modo de aplicação, uma vez que o acordado com a *Earthship Biotecture Portugal* era que os materiais não seriam aplicados permanentemente na sala de aula disponibilizada.

O tempo foi determinante uma vez que era necessário conciliar as medições na Escola Básica do 1.º Ciclo de Santiago de Candoso com as idas dos estudantes do *Civil'in* à mesma.

O *Civil'in* é um programa de acolhimento de novos estudantes da FEUP pelos estudantes que já frequentam o Mestrado Integrado em Engenharia Civil na FEUP - os tutores, que além do acompanhamento pessoal, proporcionam aos estudantes a possibilidade de participar em diversas atividades de enriquecimento curricular ao longo do ano, como *workshops*, palestras, convívios, entre outros [86].

Neste caso, ficou previamente acordado com os responsáveis do *Civil'in*, que os estudantes fariam duas visitas à Escola Básica do 1.º Ciclo de Santiago de Candoso, uma primeira realizada a 7 de março de 2018 e uma segunda realizada a 14 de março de 2018. Como tal, era obrigatório definir os materiais, reuni-los, prepará-los e transportá-los para a Escola Básica do 1.º Ciclo de Santiago de Candoso em cerca de duas semanas.

Fixou-se a necessidade de obter 20 m² de cada material, num “compromisso” entre a capacidade de reunir os materiais, de os preparar, transportar, aplicar em tempo útil e de estes apresentarem condições acústicas mínimas para a obtenção de resultados viáveis e mensuráveis.

A seleção de uma base física para fixar os materiais reunidos, que permitisse movimentar uma grande área de material rapidamente, era também essencial, uma vez que, os estudantes do *Civil'in* estariam no máximo cerca de três horas em cada visita à Escola Básica do 1.º Ciclo de Santiago de Candoso e, como tal, era fundamental que as medições fossem realizadas sem atrasos.

Nesse sentido, optou-se por uma base em placas de cartão canelado duplo, pela sua leveza, baixo custo, garantia de alguma estabilidade e grandes dimensões, em comparação com outras possíveis bases como placas de madeira, redes, entre outras. A base definida não tem influência significativa nas medições acústicas realizadas pois para a correção acústica o que é importante é a superfície diretamente exposta ao som, que neste caso são os materiais de desperdício.

Posto isto, devido à grande quantidade de material que foi necessário reunir (cerca de 20 m² para cada material), ao pouco tempo disponível para os recolher (cerca de duas semanas), ao pouco tempo disponível para as medições com os materiais de desperdício (realizadas na tarde de 14 de março de 2018), ao modo de preparação das amostras (colagem dos materiais a placas de cartão canelado duplo, anexo A) e às dificuldades de transporte (devido às dimensões das placas de cartão, 2,8 por 1,2 m), selecionaram-se três materiais de desperdício: copos plásticos para café, tabuleiros para ovos e espuma proveniente de colchões de retomas.

A ideia dos copos plásticos de café surgiu após se observar o constante e abundante desperdício de copos de café na FEUP. Os copos utilizados neste estudo possuem 5 cm de altura, 5,7 cm de diâmetro superior e 3,7 cm de diâmetro inferior. São produzidos em poliestireno, possuem cor branca e foram colados em disposição quincôncio (figura 5.6). Foram ainda furados na base (diâmetro de aproximadamente 10 mm) com ferro de soldar, depois de ensaiados na câmara reverberante, com o objetivo de perceber se existem vantagens ao nível da absorção sonora (figura 5.7).

Os tabuleiros para ovos foram cedidos por uma confeitaria/padaria, são produzidos em celulose moldada, cada tabuleiro tem cerca de 5 cm de altura e forma quadrangular com 29 cm de lado (figura 5.8).



Figura 5.6 - Copos plásticos de café em disposição quincôncio



Figura 5.7 - Copos plásticos de café em disposição quincôncio, furados com ferro de soldar (10 mm de diâmetro)

Os tabuleiros para ovos foram ensaiados com a face inversa exposta ao som (figura 5.8) uma vez que desta forma apresentam melhores condições de absorção sonora, como concluiu o estudo de S. Vieira [76].



Figura 5.8 - Tabuleiros para ovos em celulose moldada com a face inversa exposta ao som

Após estabelecido contacto com várias empresas à procura de materiais desperdiçados em grandes quantidades, uma indústria de comércio de produtos ortopédicos dispôs-se a facultar a espuma de colchões de retomas. Estes colchões são compostos por 2 cm de uma espuma viscoelástica perfilada com 50 kg/m^3 e 4 cm de espuma de alta resiliência (HR) com 35 kg/m^3 (figura 5.9).

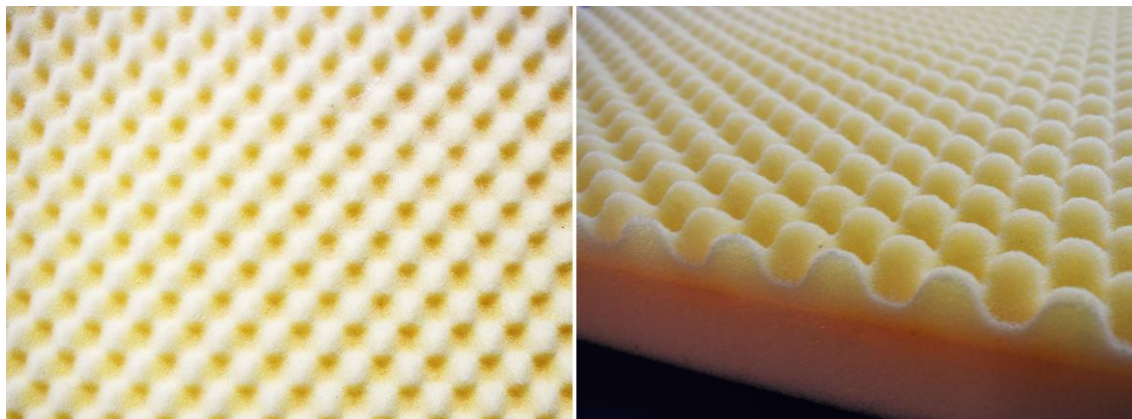


Figura 5.9 - Colchões de retomas compostos por 2 cm de espuma viscoelástica perfilada e 4 cm de espuma de alta resiliência

No entanto, já existia um painel com 4 cm de espessura colocado em cerca de 8 m^2 da face interior da parede de fachada da sala de aula disponibilizada. Como tal, questionou-se a *Earthship Biotecture Portugal*, que à data é a empresa que está responsável pela escola, sobre o motivo e objetivo da colocação deste material na sala de aula, sobre a data e sobre os responsáveis pela aplicação do painel. Em resposta, explicaram que o painel foi colocado na sala em 2015, numa tentativa de melhorar as condições de conforto térmico e acústico da sala de aula, no entanto desconhecem quem foi responsável pela aplicação do mesmo e apenas referem que foi realizado com material de desperdício.

Após pesquisar sobre o assunto encontrou-se um painel termoacústico fabricado sob critérios ambientais, com material 100% reciclado na sua composição, denominado como *NaturDecoTech* [87], em tudo similar ao que se encontra aplicado na sala de aula objeto deste trabalho. Concluiu-se então, que o painel aplicado na sala de aula estudada detém uma composição de 50% vermelho e 50% tons diversos, sendo 100% produzido com pele de origem animal (figura 5.10) [87].



Figura 5.10 - Painel *NaturDecoTech*, presente na face interior da fachada principal da sala de aula analisada [87]

Durante este trabalho decorreram também na mesma sala de aula, monitorizações térmicas (da temperatura e da humidade relativa), para uma outra dissertação de Mestrado Integrado de Engenharia Civil na FEUP [88]. O material de desperdício estudado nesta dissertação (figura 5.11) corresponde a um resíduo têxtil da reciclagem de pneus, que foi colocado em cerca de 11 m² da parede de fachada da sala de aula, envolvido numa tela de solo.

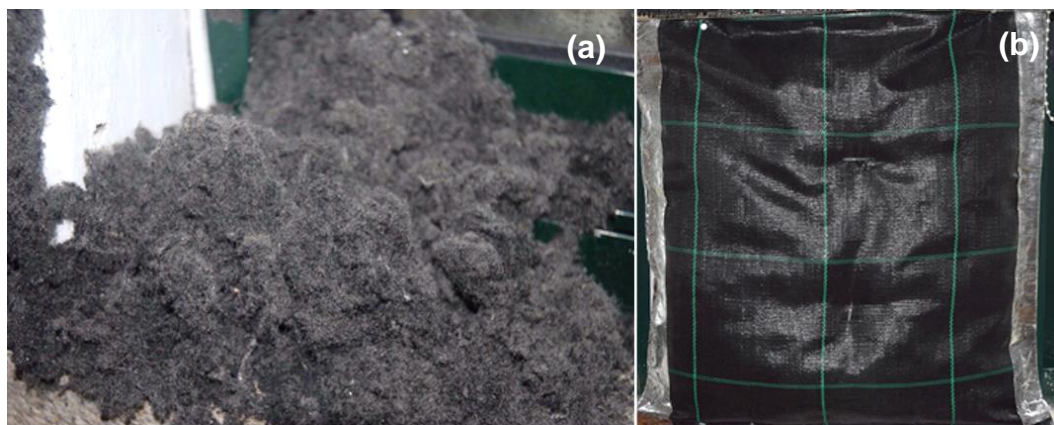


Figura 5.11 - Material de desperdício colocado na face interior da parede de fachada da sala de aula, sendo: (a) resíduo têxtil desperdiçado na reciclagem de pneus; (b) tela de solo em que se envolveu o resíduo têxtil para fixação à parede

5.4. METODOLOGIA ADOTADA E EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

5.4.1. PARÂMETROS ACÚSTICOS MEDIDOS

Com o intuito de caracterizar a absorção sonora dos materiais de desperdício selecionados, realizaram-se ensaios de tempo de reverberação na câmara reverberante do Laboratório de Acústica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (LAfeup), com a câmara vazia e com as amostras dos copos de café sem furos (CC), dos copos de café furados na base (CCf), dos tabuleiros para ovos (TO) e das espumas de colchões (E) colocadas sobre o revestimento de piso da câmara.

Realizaram-se também medições do tempo de reverberação, do RASTI e do ruído de fundo, na sala de aula da Escola Básica do 1.º Ciclo de Santiago de Candoso (Guimarães), antes e após a implementação das soluções de reabilitação acústica com recurso aos materiais de desperdício selecionados.

As situações ensaiadas antes das medições da sala de aula com os materiais de desperdício selecionados correspondem às situações de referência:

- SV1: sala de aula vazia, sem nenhum tipo de intervenção;
- SV2: sala de aula vazia, com o painel termoacústico e um resíduo têxtil proveniente da reciclagem de pneus, ambos aplicados na face interior da parede de fachada (em aproximadamente 8 e 11 m², respetivamente).

5.4.2. CARACTERIZAÇÃO DOS COEFICIENTES DE ABSORÇÃO SONORA DAS AMOSTRAS EM CÂMARA REVERBERANTE

A caracterização dos coeficientes de absorção sonora dos materiais de desperdício em estudo realizou-se a 5 de março de 2018 na câmara reverberante do LAfeup. Esta possui 205 m³ de volume e cumpre todas as especificações normativas para a realização de ensaios de absorção sonora.

Através da medição do tempo de reverberação, pelo método do ruído interrompido, nas bandas de frequência de terço de oitava dos 100 aos 5 000 Hz, calculou-se o coeficiente de absorção sonora de acordo com as recomendações da norma NP EN ISO 354 [89].

O método do ruído interrompido tem como princípio de funcionamento a obtenção de várias curvas de decaimento através do registo direto do decaimento do nível de pressão sonora após excitação da câmara reverberante com ruído branco. Para cada posição das fontes sonoras ensaiaram-se duas posições dos microfones, o que totaliza quatro posições diferentes em que se realizaram três medições do tempo de reverberação. Para reduzir a incerteza das medições, as curvas de decaimento obtidas resultam do cálculo dos valores médios das medições realizadas.

Conforme já referido no capítulo 2, o tempo de reverberação é determinado a partir do decaimento de 20 ou 30 dB e depois é extrapolado através de regressão linear pelo método dos mínimos quadrados, para determinar o tempo de reverberação correspondente ao decaimento dos 60 dB.

A área da amostra ensaiada na câmara reverberante deve estar compreendida entre 10 e 12 m² e esta deve ser colocada no pavimento e apresentar forma retangular, com uma relação largura-comprimento entre 0,7 e 1,0. Neste estudo, as amostras apresentavam 10,08 m² e uma relação entre largura e comprimento de $2,8/3,6 \cong 0,78$, que pertence ao intervalo especificado anteriormente.

Para a realização dos ensaios de absorção sonora dos materiais de desperdício na câmara reverberante foram utilizados os seguintes equipamentos (figura 5.12):

- Sistema de aquisição de dados *Brüel & Kjaer PULSE* - Tipo 3560-D;
- Software de aquisição e tratamento de dados *Brüel & Kjaer PULSE v. X*;
- 2 Fontes sonoras semiomnidirecionais *JBL EON 15-62*;
- 4 Microfones *Brüel & Kjaer ½* - Tipo 4190;
- Calibrador *Brüel & Kjaer* - Tipo 4226.

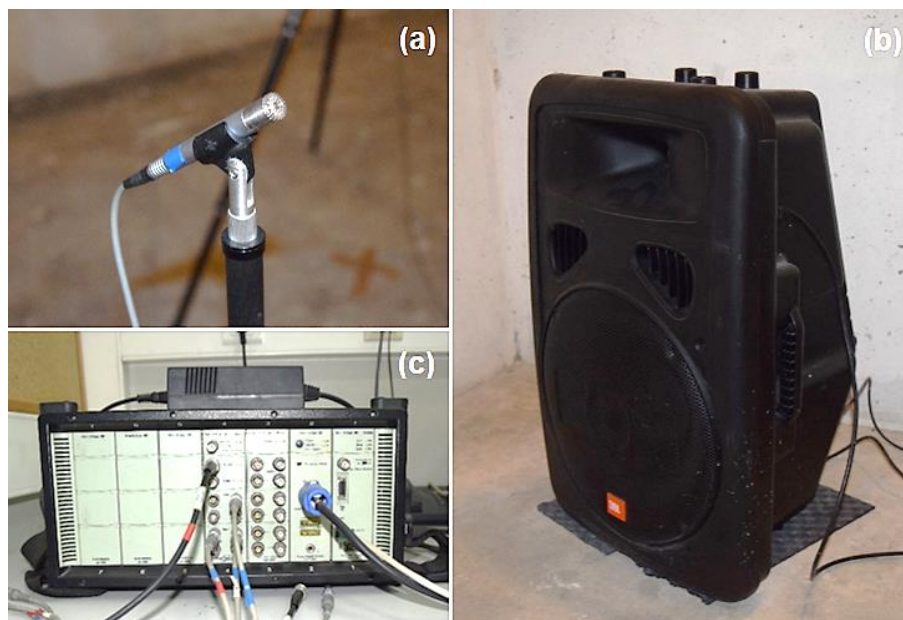


Figura 5.12 - Equipamentos utilizados na medição do tempo de reverberação na câmara reverberante do Laboratório de Acústica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (LAfeup): (a) microfone; (b) fonte sonora; (c) sistema de aquisição de dados

Para melhor visualização, apresenta-se na figura 5.13 um esquema em planta da câmara reverberante do LAfeup, onde se realçam as suas dimensões, a sua geometria assimétrica, assim como a localização das duas fontes sonoras e dos quatro microfones que possuem duas posições cada (FSi e FSi', Mi e Mi') perfazendo um total de quatro combinações de posições. As fotografias da figura 5.14 permitem observar a montagem das amostras na câmara reverberante.

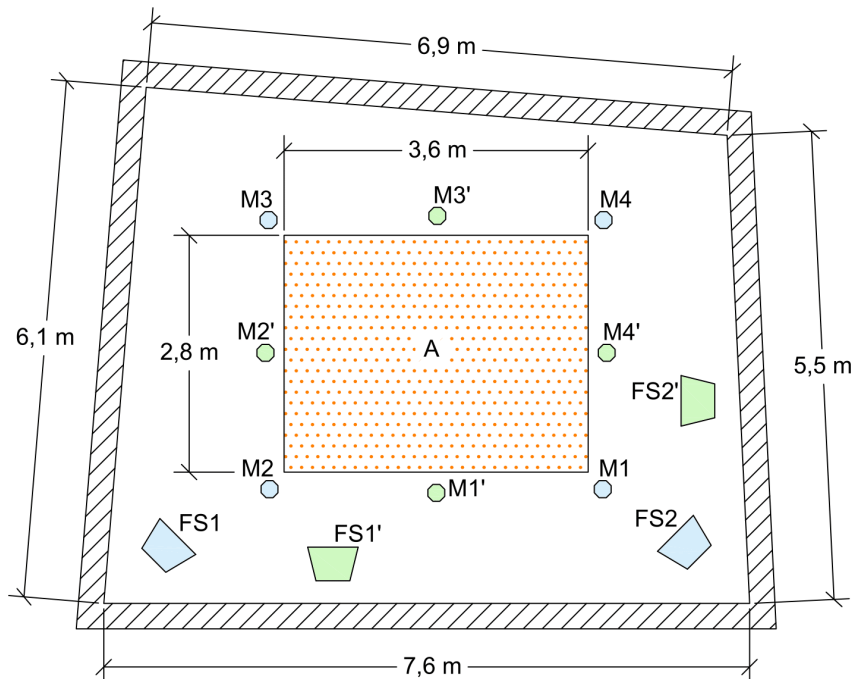


Figura 5.13 - Planta esquemática da câmara reverberante do Laboratório de Acústica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (LAfeup), com a amostra (A), as duas posições das fontes sonoras (FSi e FSi') e as duas posições dos microfones (Mi e Mi') assinaladas

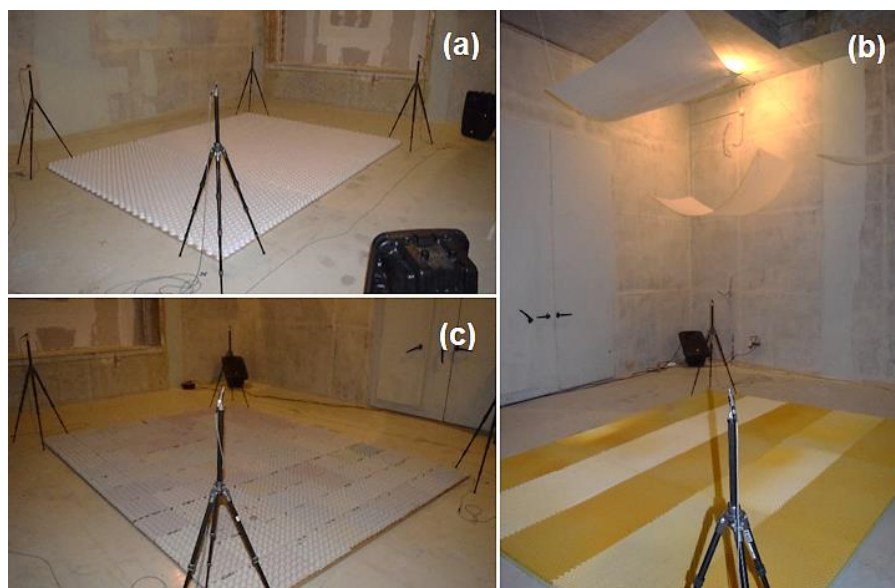


Figura 5.14 - Determinação da absorção sonora das amostras: (a) dos copos de café; (b) das espumas; (c) dos tabuleiros para ovos, na câmara reverberante do Laboratório de Acústica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (LAfeup)

5.4.3. MEDIÇÃO DO TEMPO DE REVERBERAÇÃO NA SALA DE AULA

Para avaliar o tempo de reverberação na sala de aula seguiram-se as recomendações da norma NP EN ISO 3382-1 [90]. O tempo de reverberação na situação de referência SV1 mediu-se a 12 de março de 2018, enquanto que a situação de referência SV2 e as situações com os materiais de desperdício se ensaiaram a 14 de março de 2018.

Avaliaram-se três posições diferentes e em cada posição efetuaram-se duas leituras, rodando entre cada leitura, a direção do microfone do sonómetro num ângulo de aproximadamente 30° com o eixo da sala, para garantir fiabilidade.

A fonte sonora emitiu um ruído com características aproximadas de ruído branco, durante 10 segundos e foi colocada no eixo central da sala de aula, no local habitualmente ocupado pelo professor.

O sonómetro, colocado em cada um dos pontos escolhidos, registou as diferenças do nível de pressão sonora ao longo do tempo de medição e calculou o tempo de decaimento correspondente a 20 ou 30 dB, fazendo depois a extrapolação para o valor de 60 dB, para as bandas de frequência de terço de oitava dos 100 aos 5 000 Hz.

Cada medição realizou-se a uma altura de aproximadamente 1,30 m e o valor do tempo de reverberação final, relativo a cada ponto de medição, corresponde à média aritmética das duas leituras realizadas em cada posição. No decorrer das medições a sala de aula encontrava-se vazia (condição em que nos foi disponibilizada) e estava presente apenas o operador do sonómetro.

Para a realização dos ensaios de tempo de reverberação na sala de aula disponibilizada foram utilizados os seguintes equipamentos (figura 5.15):

- Sonómetro *Brüel & Kjaer*, modelo 2260;
- Fonte sonora *Brüel & Kjaer*, modelo 4224.

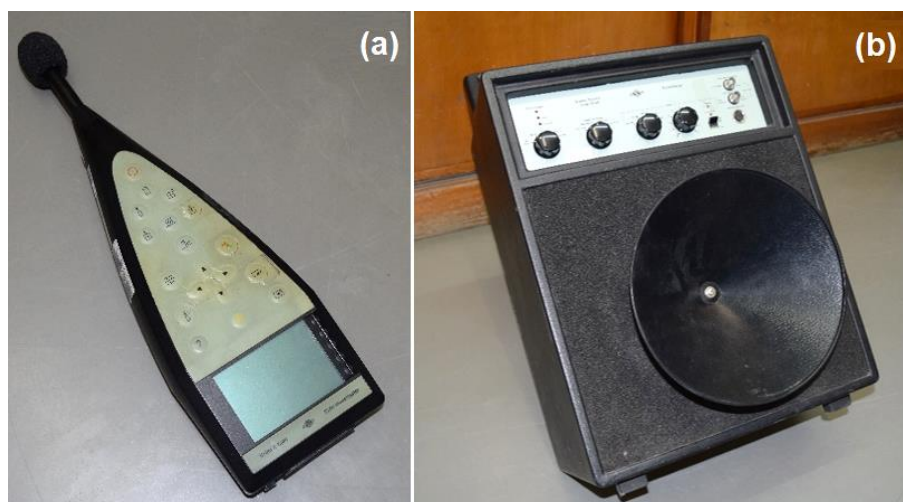


Figura 5.15 - Equipamentos utilizados na medição do tempo de reverberação na sala de aula: (a) sonómetro; (b) fonte sonora

Neste ensaio, os dois equipamentos encontravam-se ligados entre si uma vez que o ruído emitido era interrompido por ordem do sonómetro (figura 5.16).



Figura 5.16 - Medição do tempo de reverberação na sala de aula, na situação de referência SV1 (sala de aula vazia, sem nenhum tipo de intervenção)

Para melhor visualização, apresenta-se na figura 5.17 um esquema em planta da sala de aula estudada, onde se realçam as suas dimensões, assim como a localização da fonte sonora (FS) e das três posições medidas pelo sonómetro (T1, T2 e T3).

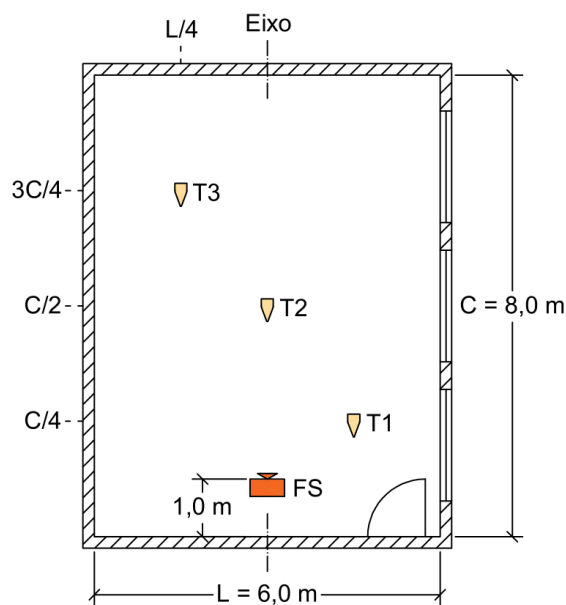


Figura 5.17 - Planta esquemática da sala de aula, com a posição da fonte sonora (FS) e as diferentes posições medidas pelo sonómetro (T1, T2 e T3) assinaladas

5.4.4. MEDIÇÃO DO RÚIDO DE FUNDO NA SALA DE AULA

No dia 6 de fevereiro de 2018 avaliou-se o ruído de fundo na sala de aula com o intuito de determinar a interferência direta do ruído ambiente exterior, ruídos de tráfego ou outros, no nível sonoro existente no interior da sala de aula estudada.

A medição do ruído de fundo na sala de aula efetuou-se em período diurno, apenas com a presença do operador do sonómetro durante as medições. É importante relembrar que a sala de aula não possui qualquer tipo de equipamento de aquecimento, ventilação e ar condicionado (AVAC) e que aquando da realização dos ensaios estavam a ser construídas um conjunto de moradias à frente da escola estudada.

A avaliação do ruído de fundo realizou-se através do registo do nível sonoro contínuo equivalente do ruído de fundo ($L_{Aeq}(rf)$), dos respetivos espectros sonoros em bandas de frequência de oitava e também da determinação dos valores de L_5 , L_{50} e L_{95} , respetivamente, ponderados com o filtro A.

Na realização dos ensaios utilizou-se o sonómetro *Brüel & Kjaer*, modelo 2260 (figura 5.15) e procurou-se sempre verificar a estabilização dos resultados.

Realizaram-se medições em duas posições, uma no interior da sala de aula e outra no exterior (figura 5.18). Em cada posição efetuaram-se medições com a duração de dois minutos e depois calculou-se a média energética.

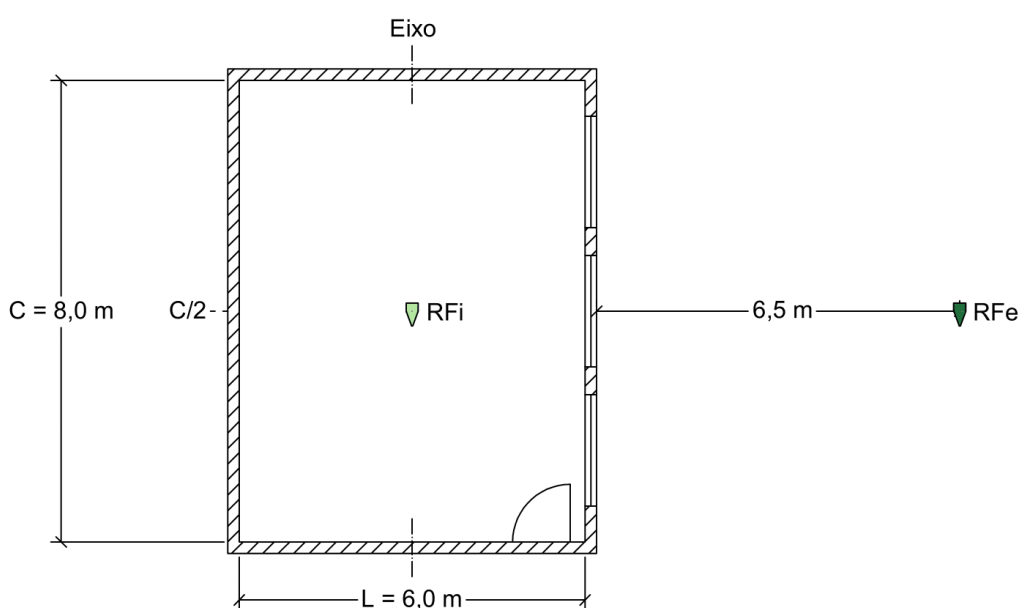


Figura 5.18 - Planta esquemática da sala de aula, com as posições de medição do ruído de fundo no interior (RFi) e no exterior da sala (RFe) assinaladas

5.4.5. MEDIÇÃO DO RASTI NA SALA DE AULA

A inteligibilidade da palavra é uma resposta humana subjetiva que pode ser objetivamente avaliada através do parâmetro RASTI, como foi esclarecido no capítulo 2 desta dissertação.

A metodologia utilizada neste trabalho para a avaliação do RASTI segue a norma IEC 60268-16 [91] e, para garantir fiabilidade, devem medir-se vários pontos, cada um dos quais mais do que uma vez. O RASTI na situação de referência SV1 mediu-se no dia 12 de março de 2018 e as restantes medições realizaram-se a 14 de março de 2018.

O emissor do RASTI foi colocado num tripé, direcionando o ruído para o eixo longitudinal da sala de aula, a uma altura semelhante à da cabeça de um orador em pé. Mediram-se seis posições diferentes ao longo da sala de aula (figura 5.21) e em cada posição, efetuaram-se repetidamente cinco leituras, calculando-se de seguida a média aritmética para cada local. Cada medição com o equipamento recetor efetuou-se a uma altura de aproximadamente $1,20\text{ m}$, o que corresponde à altura aproximada da cabeça

de uma pessoa sentada na sala de aula. O emissor do equipamento RASTI emitiu um ruído característico que foi filtrado nas duas bandas de oitava dos 500 e 2 000 Hz pela unidade móvel, que executou uma medição simples, “single”, de 8 segundos.

Para a realização dos ensaios do parâmetro RASTI da inteligibilidade da palavra na sala de aula estudada, utilizaram-se os seguintes equipamentos (figura 5.19):

- Recetor de RASTI *Brüel & Kjaer* - modelo 4419;
- Emissor de RASTI *Brüel & Kjaer* - modelo 4225.

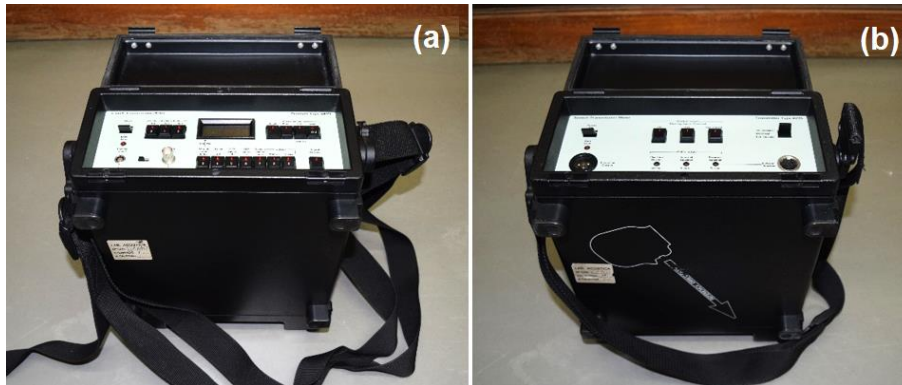


Figura 5.19 - Equipamentos utilizados na medição do RASTI (*rapid speech transmission index*) na sala de aula:
(a) recetor; (b) emissor

Durante as medições a sala de aula encontrava-se vazia (condição em que nos foi disponibilizada) e estava apenas presente o operador do sonómetro (figura 5.20).



Figura 5.20 - Medição do RASTI (*rapid speech transmission index*) na sala de aula, na situação de referência SV1 (sala de aula vazia, sem nenhum tipo de intervenção)

Para melhor visualização, apresenta-se na figura 5.21 um esquema em planta da sala de aula estudada, onde se realçam as suas dimensões, assim como a localização do emissor do RASTI (E) e das seis posições medidas pelo recetor do RASTI (1 a 6).

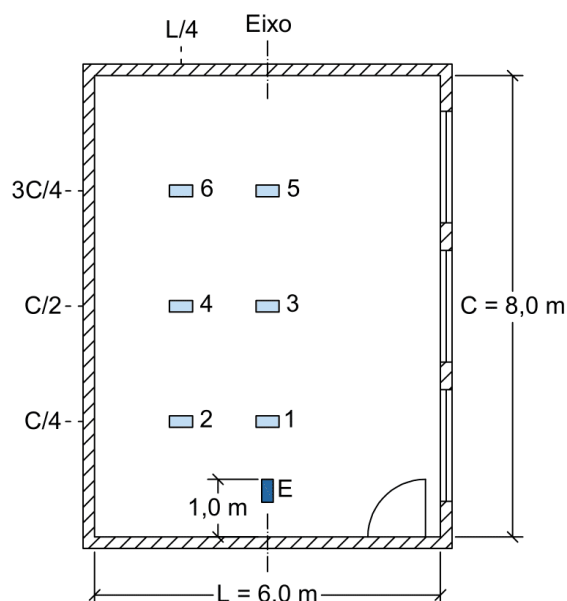


Figura 5.21 - Planta esquemática da sala de aula, com a posição do emissor (E) e as diferentes posições do recetor do RASTI (1, 2, 3, 4, 5 e 6) assinaladas

5.4.6. LOCALIZAÇÃO DOS MATERIAIS DE DESPERDÍCIO NA SALA DE AULA

Como referido anteriormente neste capítulo, antes das medições da sala de aula com os materiais de desperdício selecionados realizaram-se os ensaios das situações de referência SV1 e SV2. É importante salientar que os ensaios dos materiais de desperdício se realizaram nas condições da situação de referência SV2, isto é, com o painel termoacústico (feito à base de peles compactadas 100% recicladas) e o resíduo têxtil (proveniente da reciclagem de pneus envolvido numa tela de solo), ambos aplicados na face interior da parede de fachada (com aproximadamente 8 e 11 m², respetivamente).

Definiu-se desde início que os materiais de desperdício seriam ensaiados em diferentes localizações com o objetivo de verificar se a posição influencia os valores do tempo de reverberação medidos na sala de aula. Nesse sentido, inicialmente identificaram-se o teto e as paredes contrárias à fonte sonora (com preferência pelas partes superiores das paredes devido a serem menos sujeitas à degradação) como as localizações mais favoráveis à colocação dos materiais absorventes sonoros. No entanto, num compromisso entre a estabilidade das placas de cartão (de 2,8 m por 1,2 m), onde foram colados os materiais de desperdício, a rapidez de aplicação e as melhores posições para a obtenção de resultados viáveis, definiram-se três localizações:

- Posição a): placas de cartão pregadas na vertical na parte superior das paredes do fundo;
- Posição b): placas de cartão encostadas na longitudinal à base das paredes;
- Posição c): placas de cartão colocadas sobre o revestimento de piso.

Ensaíram-se os copos plásticos de café furados na base (CCf), os tabuleiros para ovos (TO) e as espumas (E) nas posições a), b) e c) e para o caso que apresentava a melhor absorção sonora foi ainda medido o tempo de reverberação com 22 pessoas sentadas. Na configuração do material de desperdício que apresentava o menor tempo de reverberação mediu-se também o RASTI.

Para melhor visualização, apresentam-se nas figuras 5.22, 5.23 e 5.24 esquemas da sala de aula estudada, onde se representam as diferentes posições selecionadas para as amostras de 20 m² de materiais de desperdício.

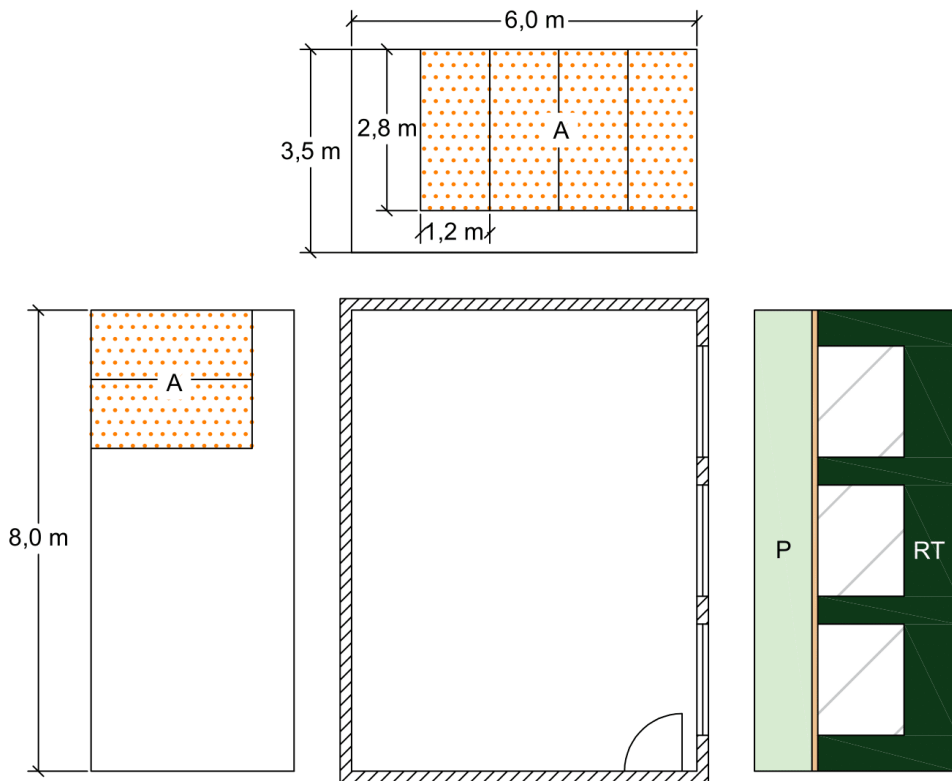


Figura 5.22 - Esquema representativo da sala de aula com a amostra de material de desperdício (A) na posição a) (na parte superior das paredes do fundo da sala), o painel termoacústico (P) e o resíduo têxtil (RT) assinalados

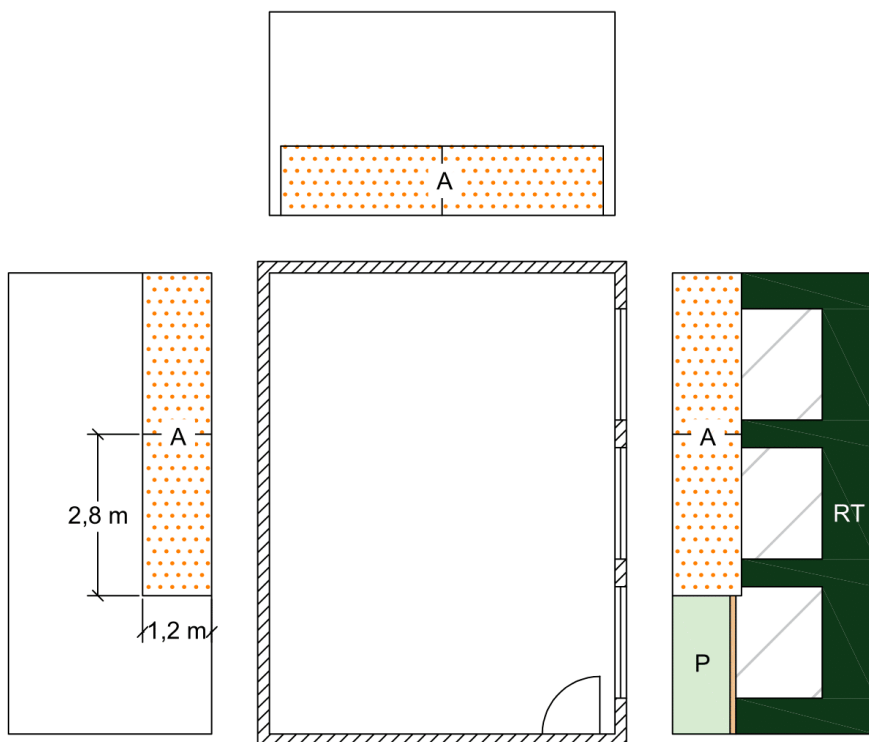


Figura 5.23 - Esquema representativo da sala de aula com a amostra de material de desperdício (A) na posição b) (encostadas na longitudinal à base das paredes), o painel termoacústico (P) e o resíduo têxtil (RT) assinalados

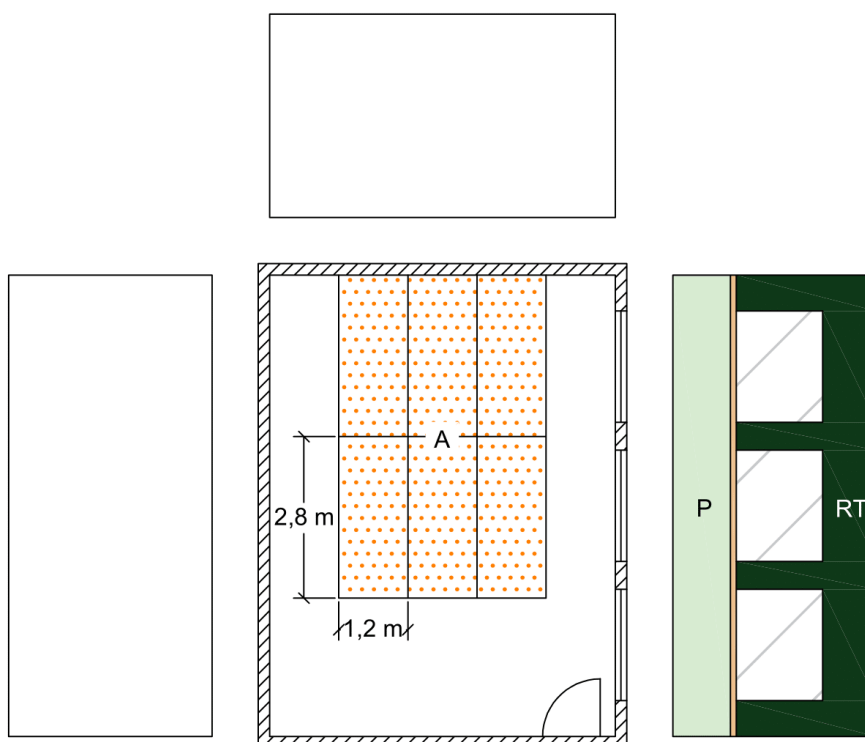


Figura 5.24 - Esquema representativo da sala de aula com a amostra de material de desperdício (A) na posição c) (sobre o revestimento de piso), o painel termoacústico (P) e o resíduo têxtil (RT) assinalados

As figuras 5.25, 5.26 e 5.27 apresentam a título exemplificativo fotografias dos materiais de desperdício dispostos nas três localizações ensaiadas.



Figura 5.25 - Amostra dos copos de café furados na base (diâmetro de 10 mm) na sala de aula, na posição c) (sobre o revestimento de piso)

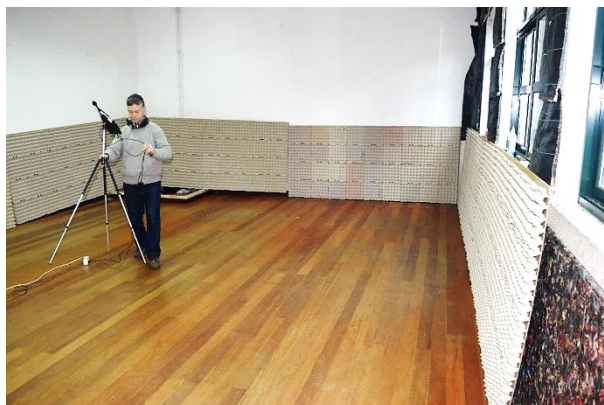


Figura 5.26 - Amostra dos tabuleiros para ovos na sala de aula, na posição b) (encostadas na longitudinal à base das paredes)



Figura 5.27 - Amostra das espumas na sala de aula, na posição a) (na parte superior das paredes do fundo), com 22 pessoas sentadas

5.5. SÍNTESE DO CAPÍTULO

Ao longo deste capítulo apresentaram-se os seguintes materiais de desperdício selecionados para o estudo de caso presente nesta dissertação:

- Copos plásticos de café (CC): produzidos em poliestireno, de cor branca, com 5 cm de altura, 5,7 cm de diâmetro superior e 3,7 cm de diâmetro inferior, colados em disposição quincôncio;
- Copos plásticos de café furados na base (CCf): furados com ferro de soldar (furos com aproximadamente 10 mm de diâmetro);
- Tabuleiros para ovos (TO): produzidos em celulose moldada, de cor natural, com 5 cm de altura e forma quadrangular com 29 cm de lado;
- Espumas de colchões de retomas (E): conjunto de 2 cm de espuma viscoelástica perfilada com 50 kg/m^3 e de 4 cm de espuma de alta resiliência (HR) com 35 kg/m^3 .

Descreveu-se ainda a metodologia dos ensaios realizados na câmara reverberante do LAfeup e na sala de aula da Escola Básica do 1.º Ciclo de Santiago de Candoso (Guimarães). No entanto, antes dos ensaios na sala de aula com os materiais de desperdício selecionados, realizaram-se medições que correspondem às seguintes situações de referência:

- SV1: sala de aula vazia, sem nenhum tipo de intervenção;
- SV2: sala de aula vazia, com o painel termoacústico e um resíduo têxtil proveniente da reciclagem de pneus, aplicados na face interior da parede de fachada (com aproximadamente 8 e 11 m², respetivamente).

Definiram-se ainda três localizações para colocar as amostras dos materiais de desperdício nos ensaios realizados na sala de aula, que correspondem à:

- Posição a): placas de cartão pregadas na vertical na parte superior das paredes do fundo;
- Posição b): placas de cartão encostadas na longitudinal à base das paredes;
- Posição c): placas de cartão colocadas sobre o revestimento de piso.

A figura 5.28 apresenta um esquema que sintetiza todos os ensaios realizados.

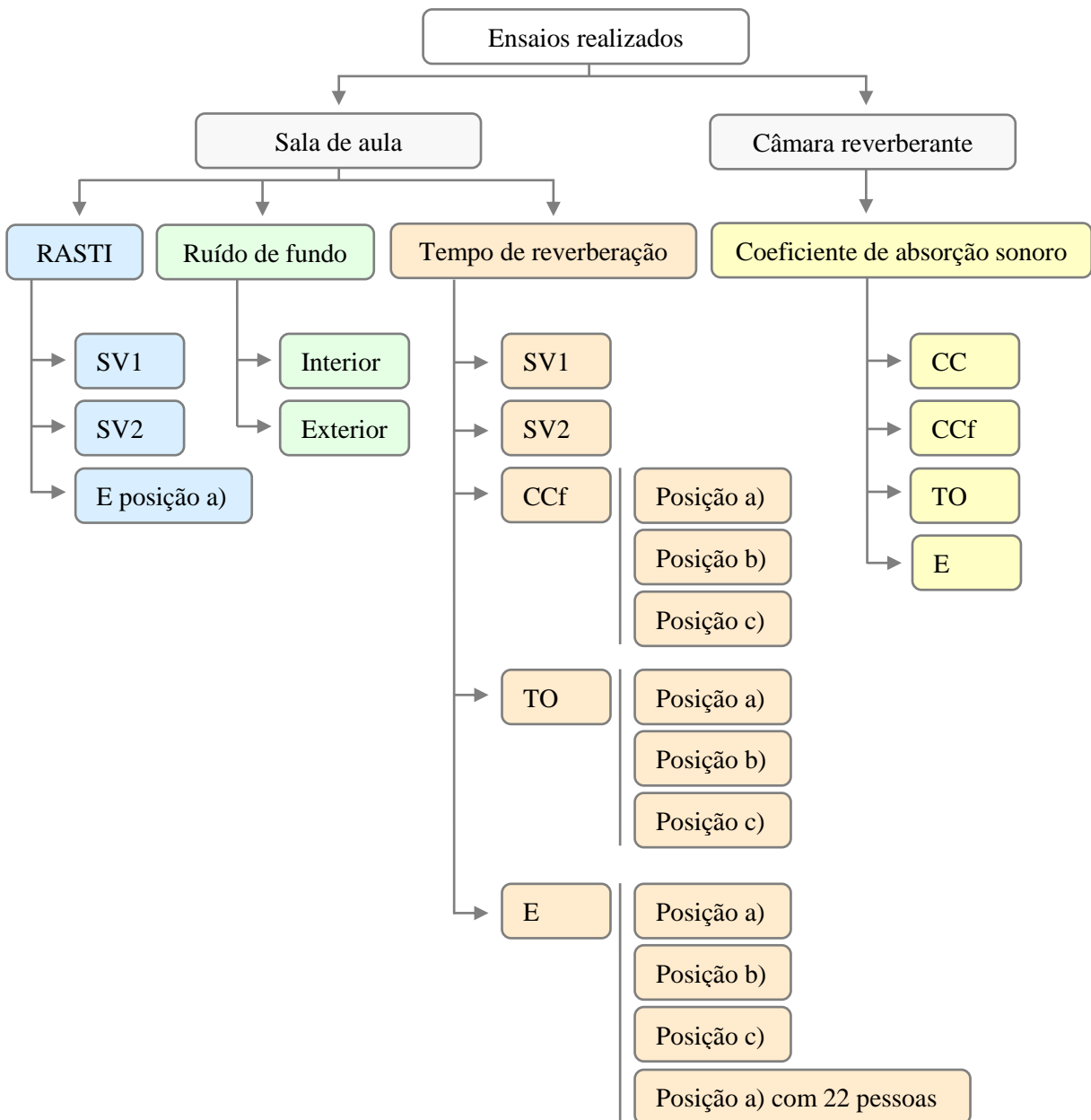


Figura 5.28 - Esquema síntese de todos os ensaios realizados

6

RESULTADOS DO CASO DE ESTUDO

6.1. INTRODUÇÃO

Na sequência da metodologia descrita anteriormente, este capítulo apresenta e analisa os resultados obtidos nos ensaios realizados na câmara reverberante e na sala de aula estudada, antes e após intervenção com materiais de desperdício não orgânico.

Considera-se importante esclarecer que se selecionou a gama de frequências dos 100 aos 5 000 Hz para apresentar os resultados do tempo de reverberação, por se considerar serem as frequências com mais influência na palavra, da gama audível ao ser humano (20 a 20 000 Hz), e por serem as que a normalização habitualmente utiliza.

Analisam-se os resultados individualmente, verifica-se se os furos (10 mm de diâmetro) na base dos copos de café influenciam a absorção sonora e comparam-se os valores obtidos para cada amostra de material de desperdício selecionado. Verifica-se o cumprimento dos valores limite regulamentares portugueses e analisam-se as áreas de material de desperdício que teriam de ser colocadas na sala, para que fosse possível diminuir o tempo de reverberação para o valor limite regulamentar presente no RRAE, assim como para o limite recomendado no capítulo 3 desta dissertação.

Adicionalmente, realizou-se uma análise teórica para avaliar a influência que a absorção sonora das amostras ensaiadas na situação de referência SV2 (sala de aula vazia, com o painel termoacústico e um resíduo têxtil proveniente da reciclagem de pneus, aplicados na face interior da parede de fachada) teria, se estas tivessem sido colocadas na SV1 (sala de aula vazia, sem nenhum tipo de intervenção), que representa melhor as escolas do 1.º Ciclo do Ensino Básico construídas aquando o Plano dos Centenários.

6.2. RESULTADOS OBTIDOS NA CÂMARA REVERBERANTE DO LAFEUP

As medições acústicas na câmara reverberante do LAfeup realizaram-se no dia 5 de março de 2018.

Inicialmente ensaiou-se a situação de referência, que corresponde à câmara reverberante vazia, e depois ensaiaram-se quatro situações em que se colocaram as amostras dos copos de café (CC), dos copos de café furados na base (CCf), dos tabuleiros para ovos (TO) e das espumas (E) sobre o pavimento da câmara reverberante.

O quadro 6.1 apresenta os resultados obtidos para o tempo de reverberação (T) na câmara reverberante do LAfeup, em função da frequência. No anexo B apresentam-se fotografias representativas dos ensaios realizados na câmara reverberante, juntamente com a planta esquemática da mesma e com os resultados obtidos.

Quadro 6.1 - Tempo de reverberação (T) medido na câmara reverberante do Laboratório de Acústica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (LAfeup), em função da frequência, para a situação de referência (câmara reverberante vazia) e para as situações da câmara reverberante com as amostras dos copos de café (CC), dos copos de café com furos na base (CCf), dos tabuleiros para ovos (TO) e das espumas (E)

Frequência (Hz)	T medido na câmara reverberante (s)				
	Referência	CC	CCf	TO	E
100	10,77	8,68	8,52	8,02	6,20
125	11,02	8,74	8,92	7,99	6,02
160	9,55	7,77	8,07	8,05	5,44
200	8,91	7,09	7,72	7,60	4,35
250	9,17	7,14	7,09	6,53	3,98
315	9,50	7,40	6,59	5,61	3,32
400	9,46	7,16	4,56	3,85	3,11
500	9,98	6,89	4,53	3,69	2,86
630	10,00	5,35	5,01	3,64	2,76
800	9,16	5,28	4,40	2,88	2,57
1 000	8,55	5,01	4,94	2,69	2,45
1 250	7,50	3,83	4,23	2,84	2,38
1 600	6,82	3,55	3,66	2,96	2,31
2 000	6,00	3,31	3,30	2,80	2,20
2 500	5,12	3,42	3,35	2,55	2,06
3 150	4,30	3,54	3,50	2,39	1,88
4 000	3,41	2,88	2,76	2,07	1,68
5 000	2,61	2,21	2,19	1,69	1,46

A partir da fórmula de Sabine para o cálculo do tempo de reverberação e dos resultados dos tempos de reverberação apresentados no quadro 6.1, para um volume de 205 m³ da câmara reverberante do LAfeup e para uma área de 10,08 m² de cada amostra, obtiveram-se os coeficientes de absorção sonora (α_s) de cada material e em função da frequência, apresentados no quadro 6.2.

A partir dos valores do α_s presentes no quadro 6.2 calcularam-se o NRC (*noise reduction coefficient*), que se define como a média aritmética dos valores dos coeficientes de absorção sonora nas bandas de oitava dos 250 aos 2 000 Hz, e o coeficiente de absorção sonora ponderado (α_w), que se obtém por ajuste ponderado de uma curva de referência, usando as bandas de oitava dos 250 aos 4 000 Hz (quadro 6.3), como referido no capítulo 2 desta dissertação. No quadro 6.3 apresentam-se ainda as classes de absorção sonora atribuídas a cada uma das amostras ensaiadas em câmara reverberante, de acordo com os intervalos referidos no capítulo 2 deste trabalho.

Quadro 6.2 - Coeficientes de absorção sonora (α_s), em função da frequência, das amostras dos copos de café (CC), dos copos de café com furos na base (CCf), dos tabuleiros para ovos (TO) e das espumas (E)

Frequência (Hz)	α_s			
	CC	CCf	TO	E
100	0,07	0,08	0,10	0,22
125	0,08	0,07	0,11	0,25
160	0,08	0,06	0,06	0,26
200	0,09	0,06	0,06	0,38
250	0,10	0,10	0,14	0,46
315	0,10	0,15	0,24	0,64
400	0,11	0,37	0,50	0,70
500	0,15	0,39	0,56	0,81
630	0,28	0,32	0,57	0,85
800	0,26	0,38	0,77	0,91
1 000	0,27	0,28	0,83	0,95
1 250	0,42	0,34	0,71	0,93
1 600	0,44	0,41	0,62	0,93
2 000	0,44	0,44	0,62	0,94
2 500	0,32	0,34	0,64	0,94
3 150	0,16	0,17	0,60	0,97
4 000	0,18	0,22	0,62	0,98
5 000	0,23	0,24	0,68	0,98

Quadro 6.3 - NRC (*noise reduction coefficient*), coeficiente de absorção sonora ponderado (α_w) e classe de absorção sonora das amostras dos copos de café (CC), dos copos de café com furos na base (CCf), dos tabuleiros para ovos (TO) e das espumas (E)

Parâmetro	CC	CCf	TO	E
NRC	0,25	0,30	0,50	0,80
α_w	0,25	0,30	0,45 (M) (*)	0,75
Classe de absorção sonora	E	D	D	C

(*) O indicador de forma M significa que os coeficientes de absorção sonora medidos excedem a curva de referência em 0,25 ou mais na gama de frequência dos 1 000 - 2 000 Hz (explicação presente no subcapítulo 2.10. desta dissertação).

6.3. RESULTADOS DA SITUAÇÃO DE REFERÊNCIA SV1 DA SALA DE AULA

Os ensaios referentes à situação de referência SV1 (sala de aula vazia, sem nenhum tipo de intervenção) realizaram-se no dia 12 de março de 2018 (T e RASTI) e no dia 6 de fevereiro de 2018 (ruído de fundo). No anexo C apresentam-se as folhas de medições realizadas na sala de aula.

Os quadros 6.4, 6.5 e 6.6 apresentam os resultados obtidos para o tempo de reverberação (T), para o RASTI e para o ruído de fundo, respetivamente, nas medições realizadas na sala de aula na situação de referência SV1.

No quadro 6.4 apresenta-se, além dos resultados do tempo de reverberação em função da frequência, o tempo de reverberação médio da sala de aula na situação de referência SV1, que corresponde ao cálculo da média aritmética dos valores obtidos para as bandas de oitava centradas nas frequências de 500, 1 000 e 2 000 Hz.

Relativamente ao parâmetro da inteligibilidade da palavra, o quadro 6.5 apresenta o RASTI em função dos pontos de medição e o valor médio medido na sala de aula.

No quadro 6.6 apresentam-se os valores do ruído de fundo no interior (RFi) e no exterior (RFe) da sala de aula, em função da frequência. Apresenta-se ainda, o nível sonoro equivalente ponderado com o filtro A e a diferença do nível de pressão sonora.

Quadro 6.4 - Tempo de reverberação (T) medido na sala de aula, na situação de referência SV1 (sala de aula vazia, sem nenhum tipo de intervenção), em função da frequência

Frequência (Hz)	T (s)	T _{médio} (500 - 2k Hz) (s)
100	3,61	
125	2,95	
160	2,73	
200	1,83	
250	2,05	
315	2,72	
400	2,72	
500	2,44	
630	2,52	
800	2,46	2,51
1 000	2,47	
1 250	2,47	
1 600	2,53	
2 000	2,53	
2 500	2,43	
3 150	2,31	
4 000	2,07	
5 000	1,80	

Quadro 6.5 - RASTI (*rapid speech transmission index*) medido na sala de aula, na situação de referência SV1 (sala de aula vazia, sem nenhum tipo de intervenção)

Pontos de medição	Medições				Média por ponto	Média da sala
	1ª	2ª	3ª	4ª		
1	0,50	0,52	0,51	0,53	0,52	0,43
2	0,44	0,43	0,43	0,44	0,44	
3	0,44	0,43	0,43	0,44	0,44	
4	0,40	0,40	0,41	0,39	0,40	
5	0,39	0,41	0,40	0,41	0,40	
6	0,37	0,38	0,38	0,36	0,37	

Quadro 6.6 - Ruído de fundo medido no interior (RFi) e no exterior (RFe) da sala de aula, na situação de referência SV1 (sala de aula vazia, sem nenhum tipo de intervenção) e diminuição dos níveis de pressão sonora pela parede de fachada da sala de aula ($\Delta L = L_{\text{ext}} - L_{\text{int}}$)

Pontos de medição	Frequência (Hz)									$L_{\text{Aeq}}(\text{rf})$ (dB)
	31	63	125	250	500	1 000	2 000	4 000	8 000	
RFi	40,7	42,9	37,4	36,0	32,5	31,8	27,2	18,7	16,5	35,8
RFe	60,4	62,9	57,7	56,3	56,8	55,6	53,1	48,1	45,3	60,2
ΔL	19,7	20	20,3	20,3	24,3	23,8	25,9	29,4	28,8	24,4

6.4. RESULTADOS DA SITUAÇÃO DE REFERÊNCIA SV2 DA SALA DE AULA

Como já referido no capítulo 5 deste trabalho, ensaiaram-se duas situações de referência antes de se realizarem as medições na sala de aula da Escola Básica do 1.º Ciclo de Santiago de Candoso com os materiais de desperdício selecionados.

A separação das situações de referência SV1 e SV2 aconteceu devido às medições térmicas no âmbito da dissertação [88], que ficou responsável pela face interior da parede de fachada da sala de aula em estudo. No entanto, é necessário realçar que os materiais colocados na face interior da parede de fachada também têm influência na acústica da sala de aula.

Os ensaios referentes à situação de referência SV2 (sala de aula vazia, com o painel termoacústico e um resíduo têxtil proveniente da reciclagem de pneus, aplicados em aproximadamente 8 e 11 m² da face interior da parede de fachada, respetivamente) realizaram-se no dia 14 de março de 2018. No anexo C apresentam-se as folhas de medições realizadas na sala de aula.

Os quadros 6.7 e 6.8 apresentam os resultados obtidos para o tempo de reverberação e para o RASTI, respetivamente, nas medições realizadas na situação de referência SV2 da sala de aula.

Não se considerou relevante fazer mais medições do ruído de fundo além da inicialmente avaliada, que corresponde à situação de referência SV1, uma vez que durante os ensaios não se verificaram alterações nas fontes de ruído da sala de aula.

Quadro 6.7 - Tempo de reverberação (T) medido na sala de aula, na situação de referência SV2 (sala de aula vazia, com o painel termoacústico e um resíduo têxtil proveniente da reciclagem de pneus, aplicados na face interior da parede de fachada), em função da frequência

Frequência (Hz)	T (s)	T _{médio} (500 - 2k Hz) (s)
100	2,64	
125	2,22	
160	1,76	
200	1,26	
250	1,52	
315	1,90	
400	1,85	
500	1,83	
630	1,55	
800	1,46	1,53
1 000	1,38	
1 250	1,35	
1 600	1,47	
2 000	1,48	
2 500	1,42	
3 150	1,36	
4 000	1,29	
5 000	1,14	

Quadro 6.8 - RASTI (*rapid speech transmission index*) medido na sala de aula, na situação de referência SV2 (sala de aula vazia, com o painel termoacústico e um resíduo têxtil proveniente da reciclagem de pneus, aplicados na face interior da parede de fachada)

Pontos de medição	Medições				Média por ponto	Média da sala
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a		
1	0,64	0,63	0,65	0,64	0,64	
2	0,56	0,56	0,54	0,54	0,55	
3	0,57	0,59	0,58	0,59	0,58	
4	0,54	0,54	0,53	0,55	0,54	0,56
5	0,52	0,54	0,52	0,52	0,53	
6	0,51	0,50	0,51	0,50	0,51	

6.5. RESULTADOS COM MATERIAIS DE DESPERDÍCIO APLICADOS NA SALA DE AULA

6.5.1. COPOS DE CAFÉ FURADOS NA BASE (CCf)

Os ensaios na sala de aula referentes aos CCf realizaram-se no dia 14 de março de 2018. No anexo C apresentam-se as folhas de medições realizadas na sala de aula.

O quadro 6.9 apresenta os resultados obtidos para o tempo de reverberação (T) medido na sala de aula, em função da frequência e da posição das amostras, e o quadro 6.10 apresenta a média aritmética do T nas bandas de oitava centradas nas frequências de 500, 1 000 e 2 000 Hz, para a amostra dos copos de café furados na base (diâmetro de 10 mm) nas posições a), b) e c).

Quadro 6.9 - Tempo de reverberação (T) medido na sala de aula, para a amostra dos copos de café furados na base (CCf) nas posições a) (na parte superior das paredes do fundo), b) (encostadas na longitudinal à base das paredes) e c) (sobre o revestimento de piso), em função da frequência

Frequência (Hz)	T medido na sala de aula com os CCf (s)		
	Posição a)	Posição b)	Posição c)
100	2,43	2,09	2,44
125	1,86	1,81	1,87
160	1,58	1,42	1,63
200	1,21	1,04	1,20
250	1,19	1,13	1,33
315	1,28	1,36	1,49
400	1,48	1,21	1,18
500	1,42	1,19	1,28
630	1,39	1,30	1,27
800	1,10	1,28	1,43
1 000	0,99	1,12	1,34
1 250	1,01	1,14	1,07
1 600	1,14	1,13	1,22
2 000	1,14	1,29	1,13
2 500	1,24	1,29	1,10
3 150	1,24	1,27	1,16
4 000	1,07	1,20	1,03
5 000	0,92	1,02	0,90

Quadro 6.10 - Tempo de reverberação (T) médio nas frequências de 500, 1 000 e 2 000 Hz, para a amostra dos copos de café furados na base (CCf) nas posições a) (na parte superior das paredes do fundo), b) (encostadas na longitudinal à base das paredes) e c) (sobre o revestimento de piso)

Posição dos CCf	Posição a)	Posição b)	Posição c)
T _{médio} (500 - 2k Hz) (s)	1,21	1,22	1,22

6.5.2. TABULEIROS PARA OVOS (TO)

Os ensaios na sala de aula referentes aos TO realizaram-se no dia 14 de março de 2018. No anexo C apresentam-se as folhas de medições realizadas na sala de aula.

O quadro 6.11 apresenta os resultados obtidos para o tempo de reverberação (T) medido na sala de aula, em função da frequência e da posição das amostras, e o quadro 6.12 apresenta a média aritmética do T nas bandas de oitava centradas nas frequências de 500, 1 000 e 2 000 Hz, para a amostra dos tabuleiros para ovos nas posições a), b) e c).

Quadro 6.11 - Tempo de reverberação (T) medido na sala de aula, para a amostra dos tabuleiros para ovos (TO) nas posições a) (na parte superior das paredes do fundo), b) (encostadas na longitudinal à base das paredes) e c) (sobre o revestimento de piso), em função da frequência

Frequência (Hz)	T medido na sala de aula com os TO (s)		
	Posição a)	Posição b)	Posição c)
100	2,04	2,13	2,64
125	1,92	1,75	1,97
160	1,67	1,35	1,45
200	1,23	0,97	1,10
250	1,21	1,24	1,25
315	1,44	1,33	1,15
400	1,43	1,19	1,22
500	1,26	1,21	1,14
630	0,95	1,01	0,98
800	0,88	1,10	1,03
1 000	0,81	1,04	1,07
1 250	0,87	1,01	1,00
1 600	1,02	1,10	1,10
2 000	1,16	1,22	1,10
2 500	1,03	1,16	0,96
3 150	0,95	1,09	0,97
4 000	0,96	1,04	0,91
5 000	0,80	0,89	0,75

Quadro 6.12 - Tempo de reverberação (T) médio nas frequências de 500, 1 000 e 2 000 Hz, para a amostra dos tabuleiros para ovos (TO) nas posições a) (na parte superior das paredes do fundo), b) (encostadas na longitudinal à base das paredes) e c) (sobre o revestimento de piso)

Posição dos TO	Posição a)	Posição b)	Posição c)
$T_{\text{médio}}(500 - 2k \text{ Hz}) (s)$	1,04	1,11	1,07

6.5.3. ESPUMAS (E)

Os ensaios na sala de aula referentes às E realizaram-se no dia 14 de março de 2018. No anexo C apresentam-se as folhas de medições realizadas na sala de aula.

O quadro 6.13 apresenta os resultados obtidos para o tempo de reverberação (T) medido na sala de aula, em função da frequência e da posição das amostras, e o quadro 6.14 apresenta a média aritmética do T nas bandas de oitava centradas nas frequências de 500, 1 000 e 2 000 Hz, para a amostra das espumas nas posições a), b), c) e a) com 22 pessoas sentadas. Dado o pouco tempo disponível, apenas se realizou o ensaio com 22 pessoas sentadas para a amostra das espumas na posição a), visto que esta apresentou os menores valores do tempo de reverberação.

Quadro 6.13 - Tempo de reverberação (T) medido na sala de aula, para a amostra das espumas (E) nas posições a) (na parte superior das paredes do fundo), b) (encostadas na longitudinal à base das paredes), c) (sobre o revestimento de piso) e a) com 22 pessoas sentadas, em função da frequência

Frequência (Hz)	T medido na sala de aula com as E (s)			
	Posição a)	Posição b)	Posição c)	Posição a) com 22 pessoas sentadas
100	1,78	1,28	1,72	1,57
125	1,54	1,14	1,51	1,2
160	1,33	0,96	1,22	1,08
200	0,92	0,83	0,84	0,92
250	0,82	0,83	0,94	0,66
315	0,95	1,00	0,92	0,78
400	0,91	1,04	1,10	0,73
500	0,93	1,14	1,02	0,79
630	1,00	1,11	0,96	0,85
800	0,84	1,05	0,94	0,64
1 000	0,78	0,92	1,00	0,62
1 250	0,84	0,93	1,01	0,62
1 600	1,16	1,08	1,12	0,76
2 000	1,05	1,16	1,09	0,65
2 500	0,92	1,02	0,91	0,64
3 150	0,83	0,97	0,82	0,61
4 000	0,79	0,90	0,78	0,58
5 000	0,75	0,80	0,72	0,55

Quadro 6.14 - Tempo de reverberação (T) médio nas frequências de 500, 1 000 e 2 000 Hz, para a amostra das espumas (E) nas posições a) (na parte superior das paredes do fundo), b) (encostadas na longitudinal à base das paredes), c) (sobre o revestimento de piso) e a) com 22 pessoas sentadas

Posição das E	Posição a)	Posição b)	Posição c)	Posição a) com 22 pessoas sentadas
$T_{\text{médio (500 - 2k Hz) (s)}}$	0,94	1,05	1,02	0,70

Por falta de tempo para avaliar o RASTI em todas as configurações dos materiais de desperdício, optou-se por ensaiar apenas a solução que apresentou os menores tempos de reverberação, espumas na posição a). Assim, os resultados obtidos para o RASTI medido na sala de aula para a amostra das espumas na posição a) apresentam-se no quadro 6.15.

Quadro 6.15 - RASTI (*rapid speech transmission index*) medido na sala de aula, para a amostra das espumas (E) na posição a)

Pontos de medição	Medições				Média por ponto	Média da sala
	1ª	2ª	3ª	4ª		
1	0,80	0,79	0,78	0,79	0,79	0,73
2	0,74	0,75	0,74	0,74	0,74	
3	0,74	0,75	0,73	0,74	0,74	
4	0,71	0,69	0,68	0,71	0,70	
5	0,72	0,70	0,71	0,72	0,71	
6	0,68	0,69	0,67	0,67	0,68	

6.6. ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS NA CÂMARA REVERBERANTE DO LAFEUP

A figura 6.1 representa a evolução dos coeficientes de absorção sonora (α_s) das amostras dos materiais de desperdício selecionados, em função da frequência.

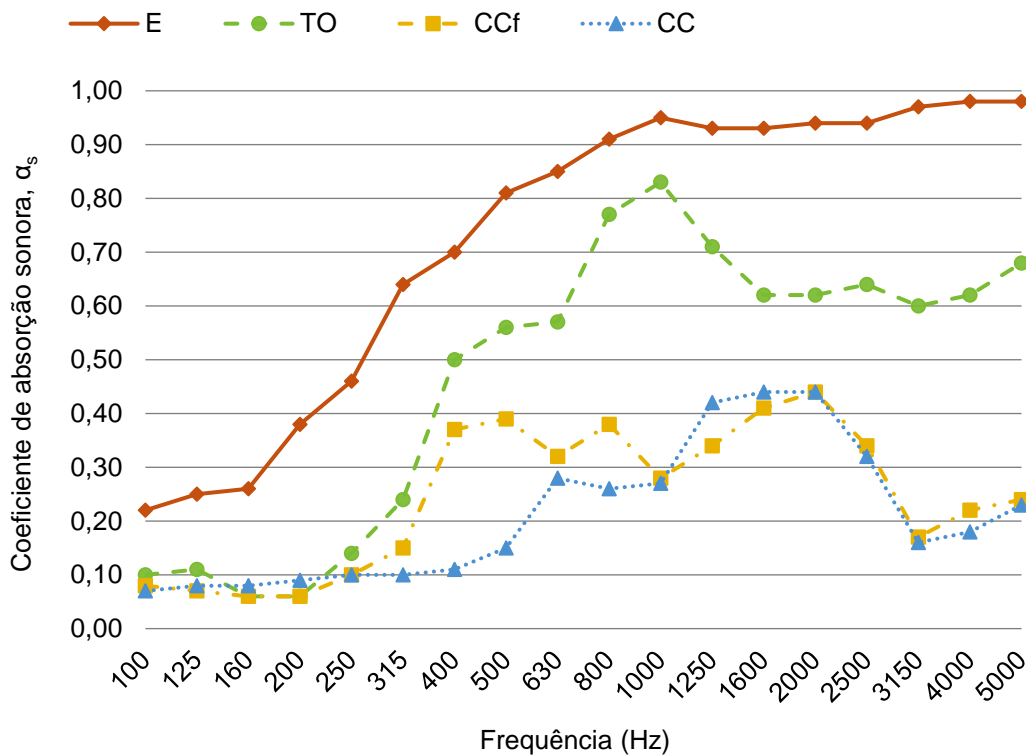


Figura 6.1 - Coeficientes de absorção sonora (α_s) das amostras dos materiais de desperdício selecionados (CC - Copos de Café, CCf - Copos de Café furados na base (diâmetro de 10 mm), TO - Tabuleiros para Ovos, E - Espumas de colchões de retomas), em função da frequência

Pela análise da figura 6.1, verifica-se que a frequência onde se encontra o valor máximo do coeficiente de absorção sonora de cada uma das amostras dos materiais de desperdício varia. Nos CC o valor máximo (0,44) acontece nas gamas de frequência dos 1 600 e 2 000 Hz e nos CCf o valor máximo (também 0,44) acontece nos 2 000 Hz, enquanto que para os TO o valor máximo (0,83) verifica-se nos 1 000 Hz e nas E o valor máximo (0,98) ocorre nas gamas de frequência dos 4 000 e 5 000 Hz.

Pela figura 6.1 e pelo quadro 6.3 observa-se que a amostra das E ($\alpha_w = 0,75$) é a que apresenta o melhor desempenho acústico comparativamente às quatro amostras ensaiadas, seguida da amostra dos TO ($\alpha_w = 0,45$ (M)), da amostra dos CCf ($\alpha_w = 0,30$) e por fim dos CC ($\alpha_w = 0,25$). Era expectável que os CC fossem a amostra que apresentasse menor coeficiente de absorção sonora, uma vez que são constituídos por plástico e, como tal, não possuem poros abertos que facilitem a absorção sonora.

Como se pode visualizar pela figura 6.1, furar a base dos CC com um diâmetro de aproximadamente 10 mm permitiu uma melhoria dos coeficientes de absorção sonora nas gamas de frequência dos 315 aos 1 000 Hz. Esta melhoria da absorção sonora nas frequências médias reflete o comportamento dos CCf como ressoadores e, portanto, permite concluir que, tal como esperado, existem vantagens a nível de absorção sonora em furar a base dos CC.

6.7. ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS NAS SITUAÇÕES DE REFERÊNCIA SV1 E SV2 DA SALA DE AULA

Na figura 6.2 apresenta-se a evolução dos valores do tempo de reverberação medido na sala de aula para as situações de referência SV1 e SV2, em função da frequência. Como expectável, o tempo de reverberação na situação referência SV1 (sala de aula vazia, sem nenhum tipo de intervenção) é significativamente superior ao obtido na situação de referência SV2 (sala de aula vazia, com o painel termoacústico e um resíduo têxtil proveniente da reciclagem de pneus, aplicados na face interior da parede de fachada) em todas as gamas de frequência.

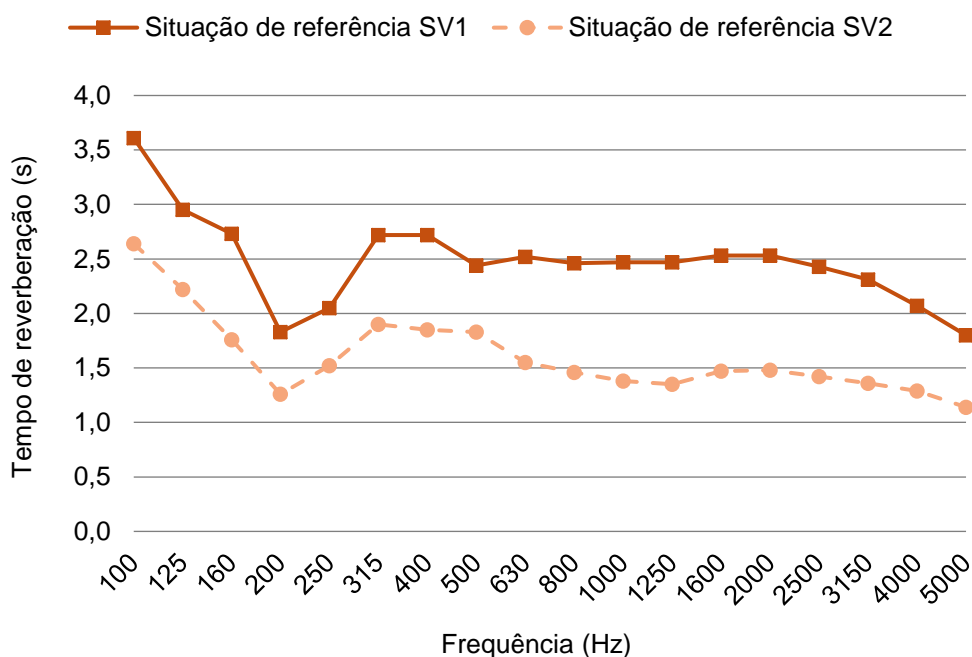


Figura 6.2 - Tempo de reverberação nas situações de referência SV1 (sala de aula vazia, sem nenhum tipo de intervenção) e SV2 (sala de aula vazia, com o painel termoacústico e um resíduo têxtil proveniente da reciclagem de pneus, aplicados na face interior da parede de fachada) da sala de aula, em função da frequência

A análise do quadro 6.16 comprova a melhoria substancial, indicada anteriormente por observação da figura 6.2, do tempo de reverberação na situação de referência SV2 (1,53 s), quando comparada com a situação de referência SV1 (2,51 s), que corresponde a uma diminuição de cerca de 0,98 s.

Ainda assim, pela observação do quadro 6.16 é possível verificar que mesmo aplicando os 25% de incerteza permitidos pelo DL 96/08 [30], o valor do tempo de reverberação médio nas frequências de 500, 1 000 e 2 000 Hz na situação de referência SV2 encontra-se bastante acima do limite regulamentar de 0,83 s e, como tal, a sala de aula não cumpre os requisitos acústicos em vigor em Portugal.

A figura 6.3 apresenta os valores obtidos para o RASTI nos diferentes locais medidos, em função da distância ao equipamento emissor (E) de RASTI, nas situações de referência SV1 e SV2.

Quadro 6.16 - Valores do tempo de reverberação (T) médio nas frequências de 500, 1 000 e 2 000 Hz, para as situações de referência SV1 (sala de aula vazia, sem nenhum tipo de intervenção) e SV2 (sala de aula vazia, com o painel termoacústico e um resíduo têxtil proveniente da reciclagem de pneus, aplicados na face interior da parede de fachada) e limite regulamentar em Portugal

Sala de aula	Volume (m ³)	T _{médio} (500 - 2k Hz) obtido (s)	Limite regulamentar $T \leq 0,15V^{1/3}$ (s)	T - I (s)	Valor limite RRAE [30]
Sit. ref. SV1	168	2,51	0,83	2,30	KO!
Sit. ref. SV2		1,53		1,32	KO!

I = Incerteza, corresponde a 25% do limite regulamentar (cf. artigo 7.º ponto 5 d), DL 96/08 [30]).

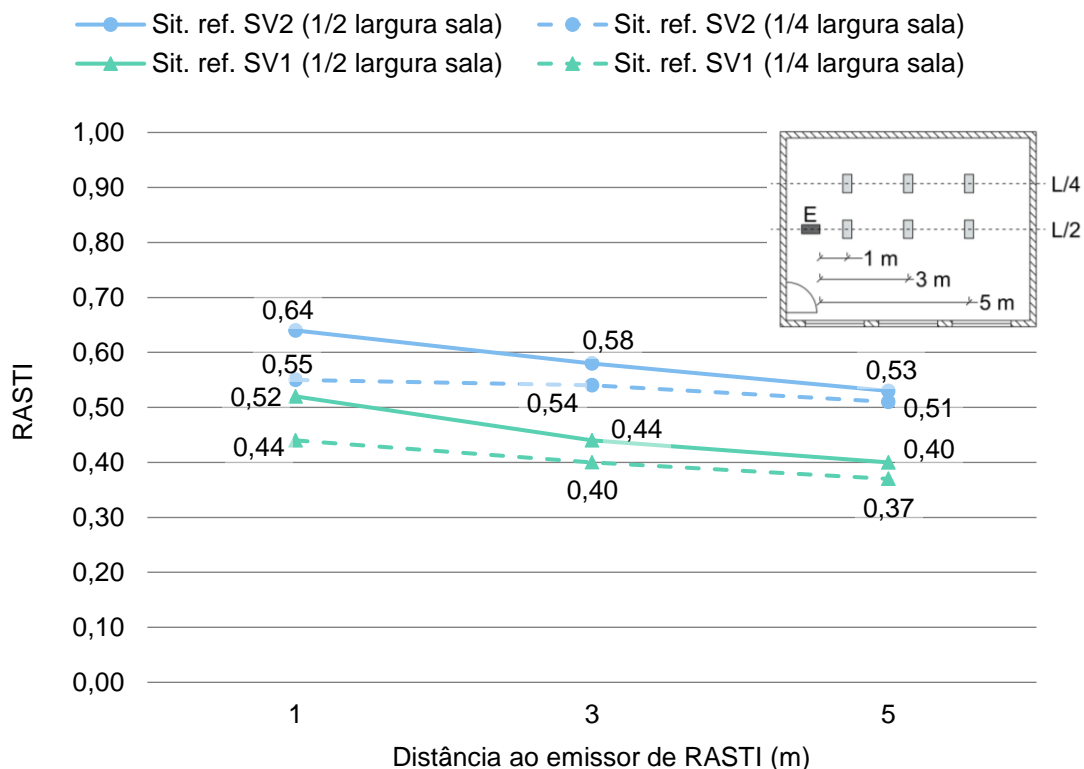


Figura 6.3 - RASTI (*rapid speech transmission index*) nas situações de referência SV1 (sala de aula vazia, sem nenhum tipo de intervenção) e SV2 (sala de aula vazia, com o painel termoacústico e um resíduo têxtil proveniente da reciclagem de pneus, aplicados na face interior da parede de fachada), em função da distância ao emissor (E) de RASTI

Em conformidade com a diminuição verificada nos valores dos tempos de reverberação, pela observação da figura 6.2, identifica-se pela análise da figura 6.3, um aumento do RASTI, da situação de referência SV1 para a situação de referência SV2.

De salientar ainda, que na figura 6.3 também é possível verificar que a inteligibilidade da palavra diminui com a distância do recetor ao emissor de RASTI e com a distância do recetor à direção principal de projeção de som do emissor, isto é, a 1/2 da largura da sala de aula a inteligibilidade é superior relativamente à inteligibilidade a 1/4 da largura da sala, se o emissor se colocar a meio da largura e se projetar o som na direção do eixo principal da sala, como se encontrava o equipamento emissor de RASTI durante os ensaios.

O quadro 6.17 confirma o referido após observação da figura 6.3, com um aumento do RASTI de 0,13 da situação de referência SV1 para a SV2, que corresponde, na escala subjetiva de inteligibilidade da palavra, a uma melhoria de classificação de *mediocre* para *suficiente*.

Quadro 6.17 - Valores médios da inteligibilidade da palavra na sala de aula, para as situações de referência SV1 (sala de aula vazia, sem nenhum tipo de intervenção) e SV2 (sala de aula vazia, com o painel termoacústico e um resíduo têxtil proveniente da reciclagem de pneus, aplicados na face interior da parede de fachada), e classificação da inteligibilidade de acordo com a escala subjetiva

Sala de aula	RASTI médio obtido	Inteligibilidade da palavra
Situação de referência SV1	0,43	<i>Mediocre</i>
Situação de referência SV2	0,56	<i>Suficiente</i>

A figura 6.4 representa a evolução do ruído de fundo medido no interior e no exterior da sala de aula, na situação de referência SV1 que, como já referido, representa o ruído de fundo em todas as seguintes fases de medições acústicas, uma vez que as fontes de ruído não se alteraram durante este trabalho.

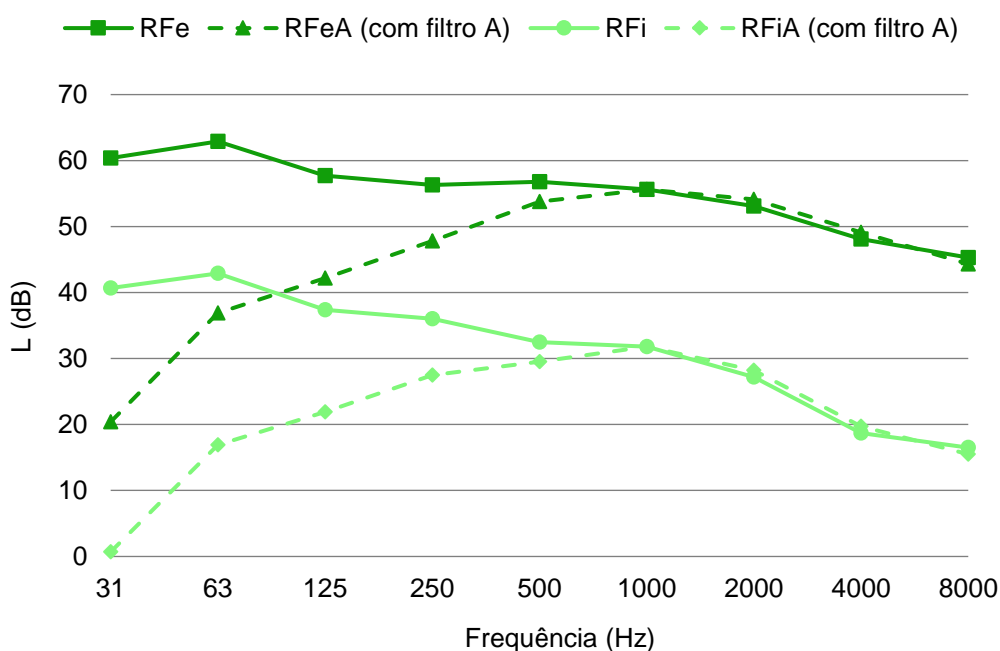


Figura 6.4 - Ruído de fundo medido no interior (RFi) e no exterior (RFe) da sala de aula, na situação de referência SV1 (sala de aula vazia, sem nenhum tipo de intervenção), com e sem o filtro A

Tal como esperado, é possível verificar pela análise da figura 6.4 que o ruído de fundo no exterior é superior ao ruído de fundo no interior da sala de aula. Uma vez que a sala não possui qualquer tipo de equipamento de aquecimento, ventilação e/ou ar condicionado (AVAC), é sensato afirmar que os níveis de ruído de fundo obtidos no interior da sala de aula dependem diretamente dos níveis de ruído de fundo medidos no exterior da mesma.

É ainda importante realçar que numa situação normal de utilização da escola, é expectável que esta apresente valores de ruído de fundo superiores aos demonstrados na figura 6.4, devido à utilização de equipamentos informáticos e ao ruído proveniente dos utilizadores.

Para complementar o estudo do ruído de fundo na sala de aula, a figura 6.5 representa a diminuição dos níveis de pressão sonora pela parede de fachada da sala de aula e permite observar uma redução de cerca de 20 dB nas baixas frequências. Conclui-se portanto, que a parede de fachada, em particular as três janelas de correr existentes, não são adequadas para uma sala de aula, uma vez que o ruído no exterior é significativo ($\cong 60$ dB(A)). Apesar do nível sonoro do ruído de fundo medido no exterior da sala de aula e do indicador de ruído de fundo L_{den} máximo definido no RGR, não partilharem do mesmo período de referência de medição, o indicador L_{den} máximo para zonas sensíveis (visto que segundo o RGR a zona da escola por vocação, deve estar definida pela Câmara Municipal de Guimarães como uma zona sensível) corresponde a 55 dB(A), que é um valor substancialmente inferior aos cerca de 60 dB(A) existentes na zona.

É sempre importante analisar a situação exterior, pois elevados níveis sonoros provenientes do exterior podem reduzir significativamente a inteligibilidade da palavra no interior das salas. Para resolver esta questão, é possível recorrer a medidas como a adoção de barreiras acústicas ou a colocação de sistemas de abertura adequados nas janelas, para colmatar o problema das frinchas.

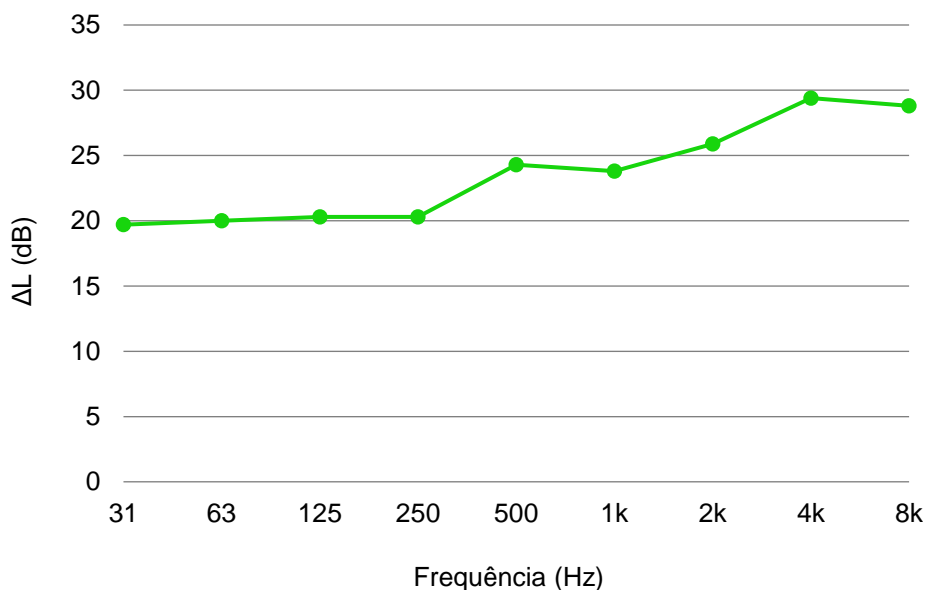


Figura 6.5 - Diminuição dos níveis de pressão sonora pela parede de fachada da sala de aula ($\Delta L = L_{ext} - L_{int}$)

No seguimento do que se referiu neste subcapítulo e uma vez que os materiais de desperdício foram ensaiados na situação de referência SV2, a análise dos resultados obtidos na sala de aula com as amostras dos materiais de desperdício foi realizada tendo como base de comparação essa situação de referência.

6.8. ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS COM OS MATERIAIS DE DESPERDÍCIO NA SALA DE AULA

6.8.1. TEMPO DE REVERBERAÇÃO

As figuras 6.6, 6.7 e 6.8 apresentam a evolução dos valores do tempo de reverberação, na situação de referência SV2, com as amostras dos CCf, TO e E nas posições a), b) e c), em função da frequência.

Através da análise das figuras 6.6, 6.7 e 6.8, é possível verificar que a evolução dos valores do tempo de reverberação com a frequência para cada uma das posições ensaiadas é muito semelhante nos três materiais de desperdício estudados. Segundo os quadros 6.10, 6.12 e 6.14, o tempo de reverberação na posição a) apresenta melhores resultados relativamente às restantes posições (exemplo: $T_{\text{médio}}(500 - 2k \text{ Hz})$, E posição a) = 0,94 s, $T_{\text{médio}}(500 - 2k \text{ Hz})$, E posição b) = 1,03 s e $T_{\text{médio}}(500 - 2k \text{ Hz})$, E posição c) = 1,02 s, que corresponde a uma $\Delta T_{\text{médio}}(500 - 2k \text{ Hz}) = 0,08 \text{ s}$). No entanto, não se pode concluir com certeza, dada a imprecisão dos diversos elementos do estudo e algoritmos de cálculo, que o posicionamento das amostras influencia o tempo de reverberação, uma vez que os valores medidos nas três diferentes posições variam menos de uma décima de segundo ($\cong 8\%$). Contudo, salienta-se que a colocação dos materiais de correção acústica próximos do teto permite uma maior preservação dos mesmos.

Ao comparar a evolução do tempo de reverberação com a frequência em cada amostra de material de desperdício ensaiada nas posições a), b) e c), observa-se que os valores correspondentes às mesmas posições nos CCf, TO e E se desenvolvem de forma idêntica (figuras 6.6, 6.7 e 6.8).

Tal como esperado, devido aos resultados obtidos na câmara reverberante, os CCf correspondem ao material ensaiado na sala de aula, que apresentou a menor diminuição do tempo de reverberação relativamente à situação de referência SV2 (figuras 6.6, 6.7 e 6.8).

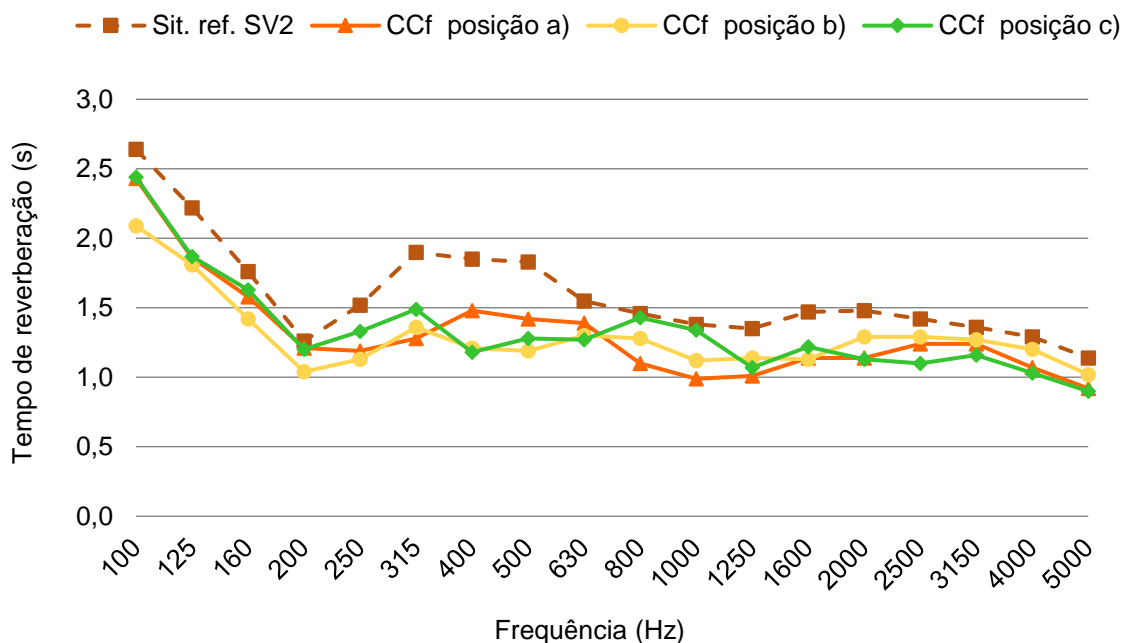


Figura 6.6 - Valores do tempo de reverberação na situação de referência SV2 (sala de aula vazia, com o painel termoacústico e um resíduo têxtil proveniente da reciclagem de pneus, aplicados na face interior da parede de fachada), com a amostra dos copos de café furados na base (CCf) nas posições a) (na parte superior das paredes do fundo), b) (encostadas na longitudinal à base das paredes) e c) (sobre o revestimento de piso), em função da frequência

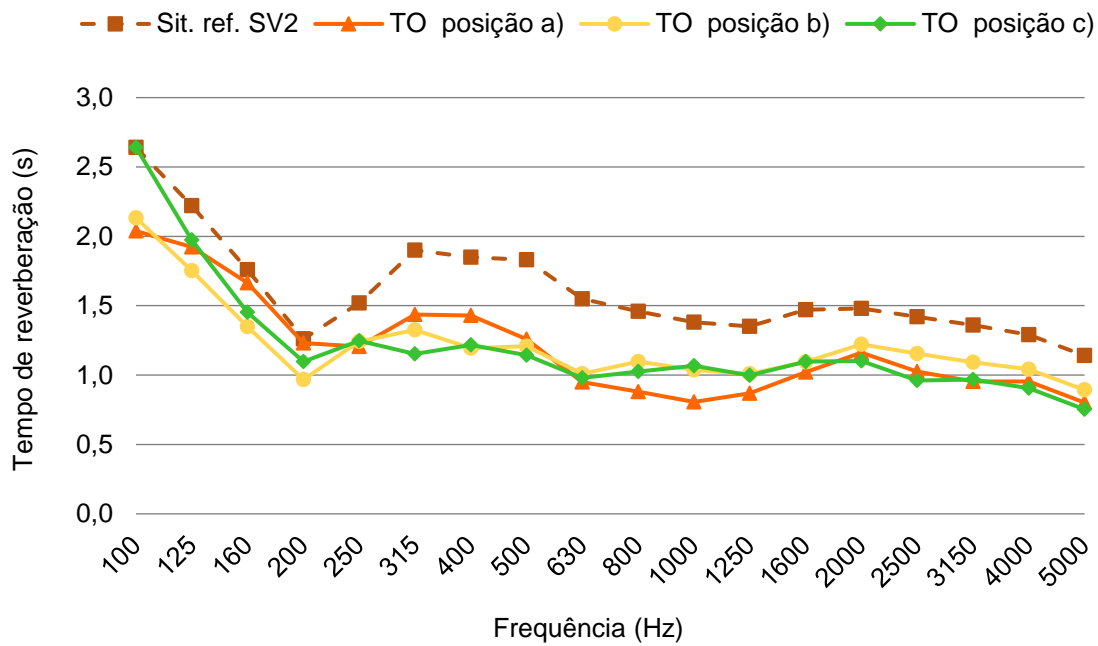


Figura 6.7 - Valores do tempo de reverberação na situação de referência SV2 (sala de aula vazia, com o painel termoacústico e um resíduo têxtil proveniente da reciclagem de pneus, aplicados na face interior da parede de fachada), com a amostra dos tabuleiros para ovos (TO) nas posições a) (na parte superior das paredes do fundo), b) (encostadas na longitudinal à base das paredes) e c) (sobre o revestimento de piso), em função da frequência

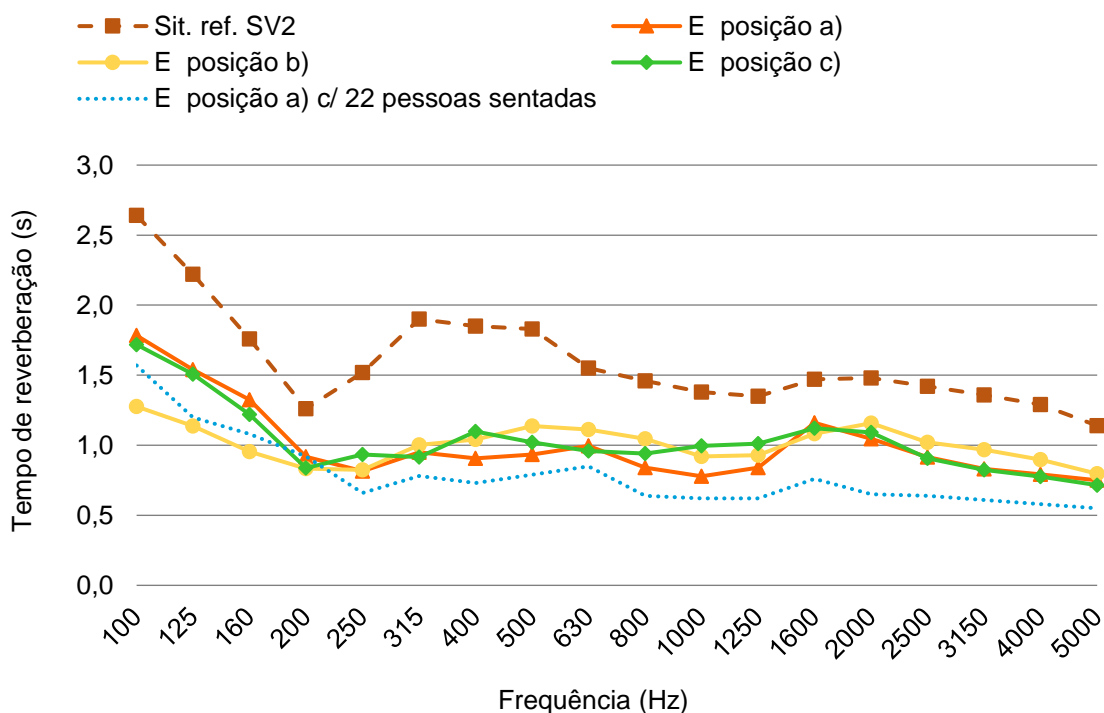


Figura 6.8 - Valores do tempo de reverberação na situação de referência SV2 (sala de aula vazia, com o painel termoacústico e um resíduo têxtil proveniente da reciclagem de pneus, aplicados na face interior da parede de fachada), com a amostra das espumas (E) nas posições a) (na parte superior das paredes do fundo), b) (encostadas na longitudinal à base das paredes), c) (sobre o revestimento de piso) e a) com 22 pessoas sentadas, em função da frequência

Considera-se também importante referir, que a amostra das E apresenta a maior diminuição do tempo de reverberação em relação aos valores da situação de referência SV2 (figuras 6.6, 6.7 e 6.8). A diminuição do tempo de reverberação, como já se referiu ao longo do presente trabalho, é um aspeto positivo, pois influencia favoravelmente a inteligibilidade da palavra. Nesse sentido, a melhor solução encontrada corresponde à amostra das E (espumas) na posição a) (na parte superior das paredes do fundo).

6.8.2. RASTI

Como referido anteriormente, mediram-se os valores de RASTI na sala de aula para a amostra do material de desperdício colocado na posição que apresentou a melhor absorção sonora, como tal, a figura 6.9 apresenta os valores obtidos para o RASTI nos diferentes locais medidos, em função da distância ao equipamento emissor (E) de RASTI, na situação de referência SV2 com a amostra das E na posição a).

Em analogia com o verificado na figura 6.3, também na figura 6.9 se observa que a inteligibilidade da palavra diminui com a distância do recetor ao emissor e com a distância do recetor à direção principal de projeção de som do emissor.

Comparando a figura 6.9 com a figura 6.3, percebe-se que devido à colocação da amostra E na posição a) se verificou um acréscimo da inteligibilidade da palavra.

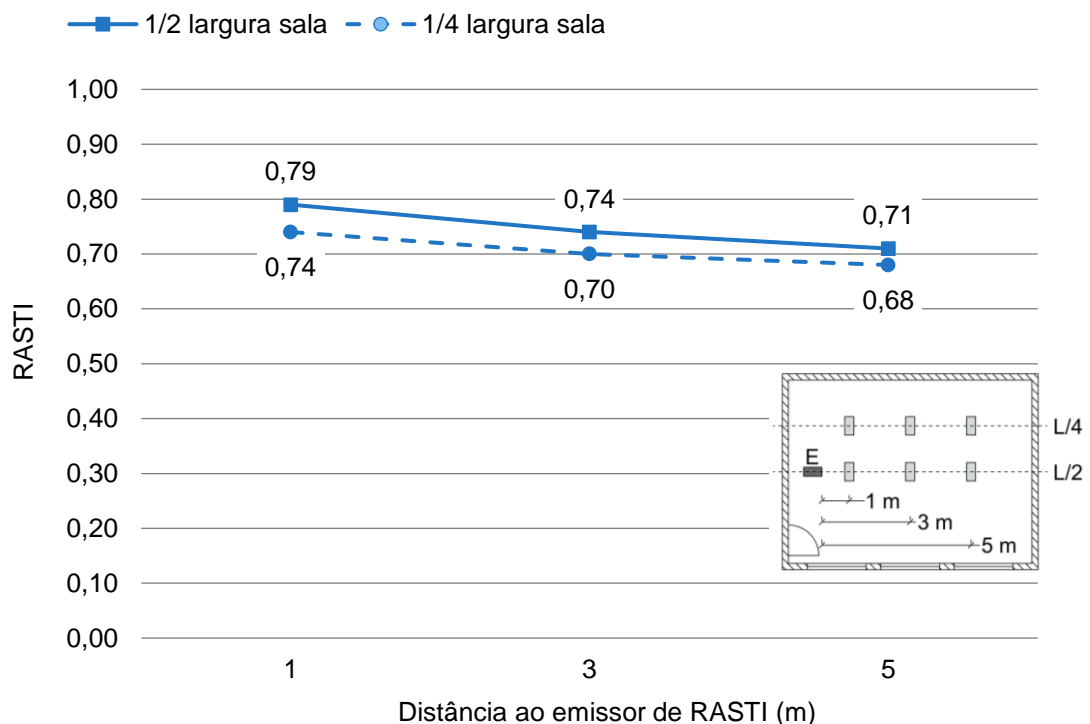


Figura 6.9 - RASTI (*rapid speech transmission index*) na situação de referência SV2 (sala de aula vazia, com o painel termoacústico e um resíduo têxtil proveniente da reciclagem de pneus, aplicados na face interior da parede de fachada) da sala de aula, para a amostra das espumas na posição a) (na parte superior das paredes do fundo), em função da distância ao emissor (E) de RASTI

Para um melhor entendimento da evolução dos resultados obtidos para o parâmetro da inteligibilidade da palavra (RASTI) ao longo das três medições efetuadas na sala de aula, apresenta-se na figura 6.10 um esquema que, entre fotografias e valores médios de RASTI na sala de aula, permite analisar que a inteligibilidade melhorou de *mediocre* para *boa*.



Figura 6.10 - Esquema de todas as medições do RASTI (*rapid speech transmission index*) com os valores médios obtidos e a inteligibilidade previsível na sala de aula

6.9. SÍNTESE DO CAPÍTULO

Neste capítulo apresentaram-se e analisaram-se os resultados obtidos na câmara reverberante do LAfeup e na sala de aula da Escola Básica do 1.º Ciclo de Santiago de Candoso (Guimarães), com o objetivo de avaliar quantitativamente a influência dos materiais de desperdício não orgânico implementados na melhoria do desempenho acústico da sala de aula.

Como síntese, as figuras 6.11 e 6.12 apresentam os resultados obtidos para todos os ensaios do tempo de reverberação e RASTI, realizados na sala de aula estudada.

Pela observação da figura 6.11 percebe-se que a colocação dos materiais na face interior da parede de fachada da sala de aula diminuiu o tempo de reverberação em todas as gamas de frequências. É também perceptível que a melhor solução ensaiada corresponde às E na posição a) com 22 pessoas sentadas, o que era expectável uma vez que o ser humano é um bom absorvente do sonoro.

No que diz respeito apenas às soluções de materiais de desperdício implementadas, pode-se observar pela figura 6.11, que os valores obtidos para o tempo de reverberação na sala de aula, com as amostras dos CCf, dos TO e das E colocadas nas diferentes posições ensaiadas não são tão distintos entre si quanto o esperado e também, na sua grande maioria, não cumprem o tempo de reverberação máximo permitido pelo RRAE, que neste caso corresponde a aproximadamente 0,83 s.

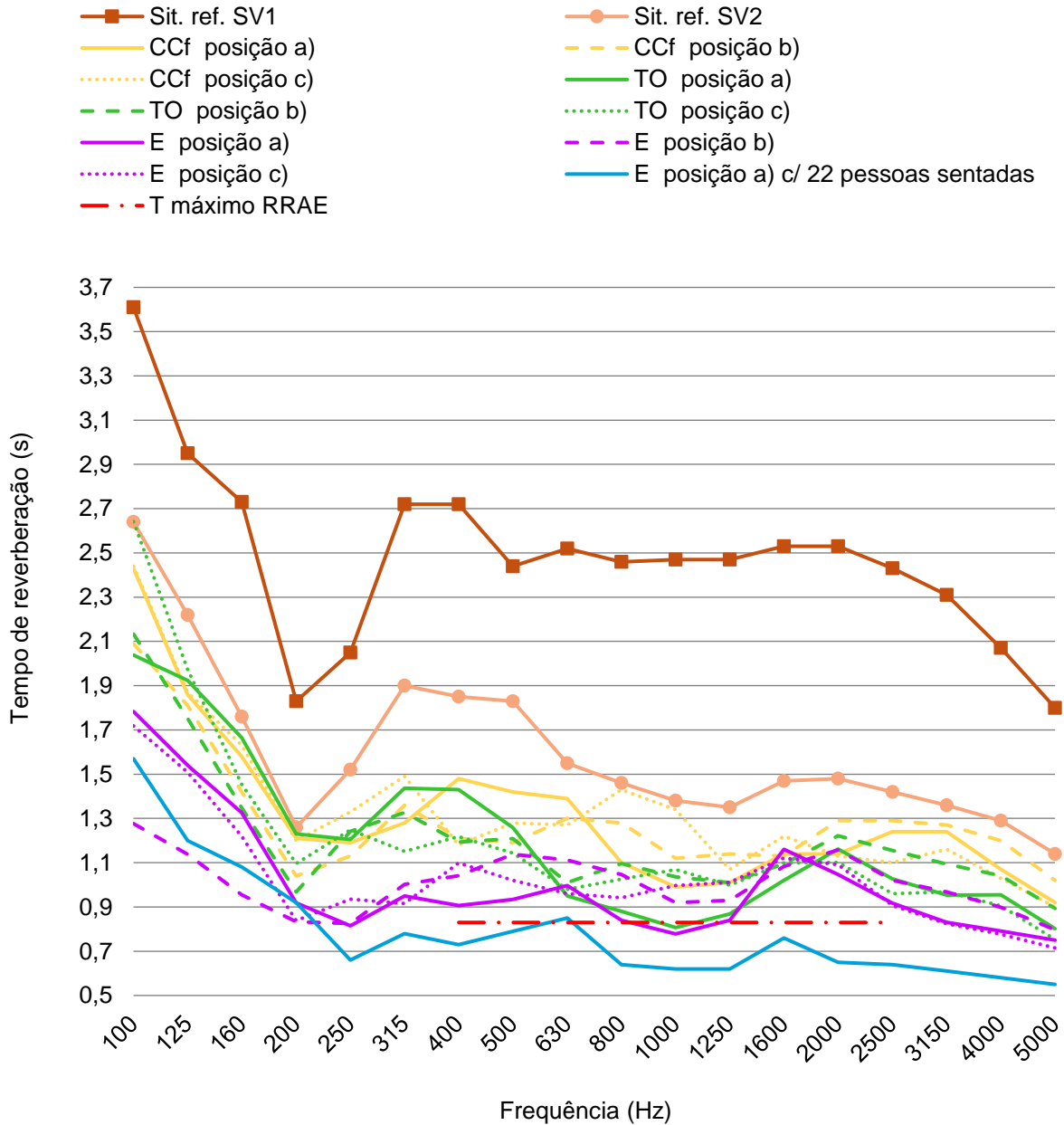


Figura 6.11 - Valores do tempo de reverberação (T) de todos os ensaios realizados na sala de aula da Escola Básica do 1.º Ciclo de Santiago de Candoso (Guimarães), em função da frequência (Situação de referência SV1 - sala de aula vazia, sem nenhum tipo de intervenção; Situação de referência SV2 - sala de aula vazia, com o painel termoacústico e um resíduo têxtil proveniente da reciclagem de pneus, aplicados na face interior da parede de fachada; CCf - Copos de Café furados na base; TO - Tabuleiros para Ovos; E - Espumas; posição a) - placas de cartão pregadas na vertical na parte superior das paredes do fundo; posição b) - placas de cartão encostadas na longitudinal à base das paredes e posição c) - placas de cartão colocadas sobre o revestimento de piso)

Nos quadros 6.18 e 6.19 apresentam-se os valores do tempo de reverberação médio nas frequências de 500, 1 000 e 2 000 Hz previsíveis de obter em medições realizadas na sala de aula, calculados a partir dos resultados de α_w obtidos em câmara reverberante, e os valores do tempo de reverberação médio nas frequências de 500, 1 000 e 2 000 Hz obtidos nos ensaios realizados na sala de aula, respetivamente. O cumprimento/incumprimento do limite regulamentar do tempo de reverberação na sala de aula (utilizando uma amostra com 20 m²) de acordo com o RRAE representa-se no quadro 6.19.

Quadro 6.18 - Tempo de reverberação médio previsível (conforme fórmula de Sabine) na sala de aula, calculado em função dos resultados obtidos em câmara reverberante

Amostra	α_w (LAfeup)	Área da amostra colocada na sala de aula (m ²)	T _{médio (500 - 2k Hz)} previsível (s)
CC	0,25	20,16	1,19
CCf	0,30		1,14
TO	0,45 (M) (*)		1,01
E	0,75		0,82

(*) O indicador de forma M significa que os coeficientes de absorção sonora medidos excedem a curva de referência em 0,25 ou mais na gama de frequência dos 1 000 - 2 000 Hz (explicação presente no subcapítulo 2.10. desta dissertação).

Quadro 6.19 - Tempo de reverberação médio nas frequências de 500, 1 000 e 2 000 Hz obtido para todos os ensaios realizados na sala de aula

Amostra	Posição da amostra (S = 20,16 m ²)	T _{médio (500 - 2k Hz)} obtido (s)	Limite regulamentar T ≤ 0,15V ^{1/3} (s)	T - I (s)	Valor limite RRAE [30] (*)	
CCf	a)	1,21	0,83	1,00	KO!	
	b)	1,22		1,01	KO!	
	c)	1,22		1,01	KO!	
TO	a)	1,04		0,83	0,83	OK!
	b)	1,11		0,90	0,90	KO!
	c)	1,07		0,86	0,86	KO!
E	a)	0,94		0,73	0,73	OK!
	b)	1,05		0,84	0,84	KO!
	c)	1,02		0,81	0,81	OK!
	a) c/ 22 pessoas sentadas	0,70	-	-	OK!	

CCf - Copos de Café furados na base (diâmetro de 10 mm); TO - Tabuleiros para Ovos; E - Espumas; posição a) - na parte superior das paredes do fundo; posição b) - encostadas na longitudinal à base das paredes; posição c) - sobre o revestimento de piso; I - Incerteza, que corresponde a 25% do limite regulamentar (cf. artigo 7.º ponto 5 d), DL 96/08 [30]);

(*) caso se utilizasse apenas 20,16 m² de material de desperdício na reabilitação.

Por comparação dos valores presentes no quadro 6.18 (previstos) com os valores do quadro 6.19 (reais), verifica-se que os valores médios previsíveis do tempo de reverberação calculados a partir dos resultados dos coeficientes de absorção sonora obtidos no LAfeup não coincidem com os valores médios do tempo de reverberação obtidos pelos ensaios realizados *in situ*. Esta diferença pode estar relacionada com o facto da câmara reverberante ser uma sala vazia com um tempo de reverberação muito longo ($T_{\text{médio}} (500 - 2\text{k Hz}) = 8,18 \text{ s}$) devido às suas superfícies muito refletoras, enquanto que a sala de aula apresenta condições diferentes ($T_{\text{médio}} (500 - 2\text{k Hz}), \text{SV2} = 1,53 \text{ s}$). Pode também estar associada com as diferentes geometrias de ambas ou com simplificações da fórmula de Sabine, que embora apenas permita valores muito próximos da realidade para locais com campos difusos e com um coeficiente de absorção sonora médio inferior a 0,20, se utilizou para calcular os tempos de reverberação médios previsíveis apresentados no quadro 6.18.

No que diz respeito aos resultados obtidos na sala de aula relativamente ao RASTI, a análise da figura 6.12 confirma que a situação de referência SV2, com a amostra das E na posição a) melhora substancialmente a inteligibilidade da palavra da sala de aula em estudo.

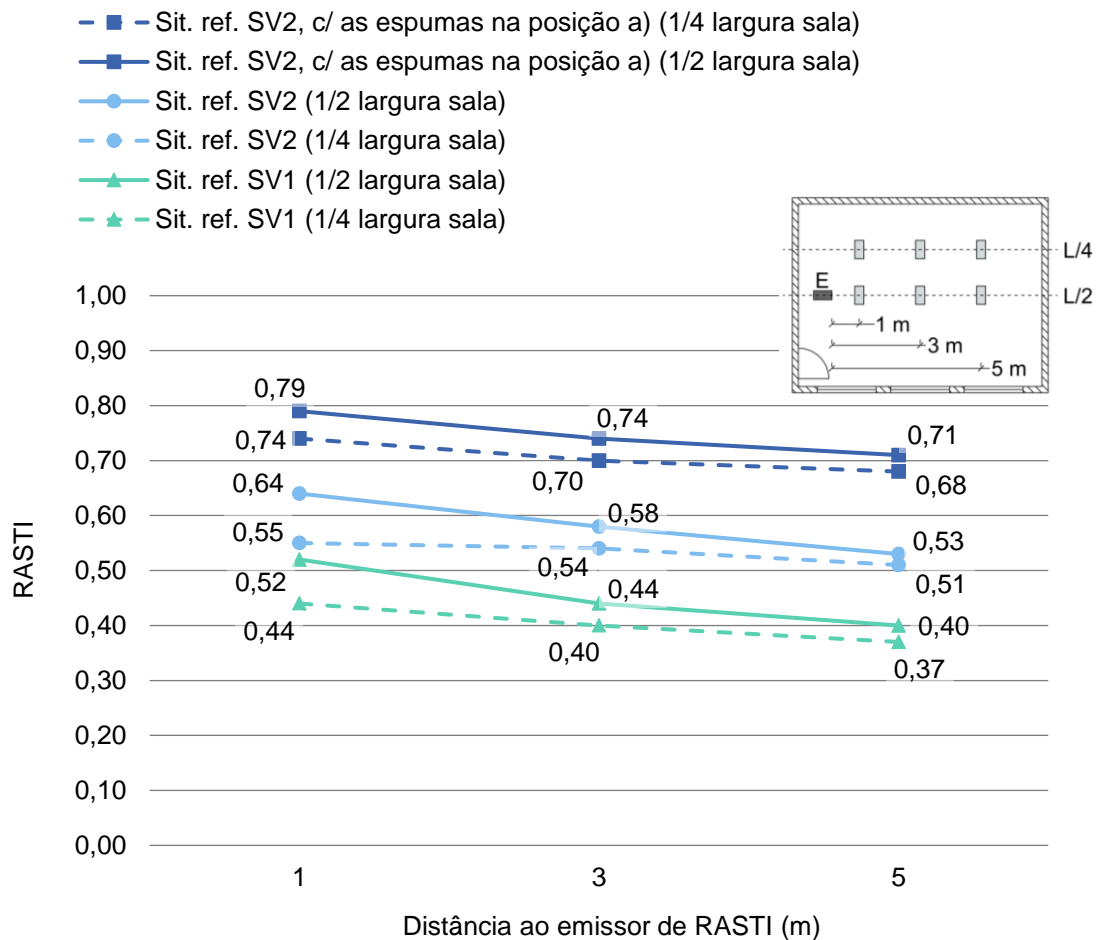


Figura 6.12 - RASTI (*rapid speech transmission index*) de todos os ensaios realizados na sala de aula da Escola Básica do 1.º Ciclo de Santiago de Candoso (Guimarães), em função da distância ao emissor (E) de RASTI (Situação de referência SV1 - sala de aula vazia, sem nenhum tipo de intervenção; Situação de referência SV2 - sala de aula vazia, com o painel termoacústico e um resíduo têxtil proveniente da reciclagem de pneus, aplicados na face interior da parede de fachada e posição a) - placas de cartão pregadas na vertical na parte superior das paredes do fundo)

Como se pode verificar pela análise do quadro 6.19, apenas a situação E na posição a) com 22 pessoas sentadas cumpre o valor limite do RRAE sem a contabilização da incerteza de 25% do limite regulamentar. Nesse sentido, calculou-se a área mínima a reabilitar na situação de referência SV2 para diminuir o tempo de reverberação da sala de aula para o limite do RRAE ($T_{\text{médio}}(500 - 2k \text{ Hz}) = 0,83 \text{ s}$) e para o valor recomendado nesta dissertação ($T_{\text{médio}}(500 - 2k \text{ Hz}) = 0,6 \text{ s}$), presente no quadro 6.20.

No entanto, apesar dos materiais de desperdício selecionados terem sido ensaiados na situação de referência SV2, a situação de referência SV1 representa uma melhor comparação com as restantes escolas do 1.º ciclo do ensino básico contruídas na época do Plano dos Centenários. Assim, calculou-se o acréscimo de absorção sonora da situação de referência SV2 para a situação de referência SV2 com as soluções dos materiais de desperdício implementados e verificou-se a influência que esse aumento de absorção sonora teria na situação de referência SV1. Como tal, o quadro 6.20 apresenta também a área mínima a reabilitar na situação de referência SV1 para diminuir o tempo de reverberação da sala de aula para o limite do RRAE ($T_{\text{médio}}(500 - 2k \text{ Hz}) = 0,83 \text{ s}$) e para o valor recomendado nesta dissertação ($T_{\text{médio}}(500 - 2k \text{ Hz}) = 0,6 \text{ s}$).

Os valores apresentados no quadro 6.20 foram calculados para os materiais de desperdício ensaiados na posição a), uma vez que o posicionamento dos materiais de correção acústica próximos do teto tem a vantagem de ser menos acessível e também porque esta posição foi a que apresentou os menores valores do tempo de reverberação em todos os materiais, embora, como se referiu anteriormente, a diferença dos valores obtidos nas diferentes posições não se tenha considerado significativa para se concluir com certeza que existe influência da posição dos materiais no tempo de reverberação.

Quadro 6.20 - Área mínima a reabilitar nas situações de referência SV2 (sala de aula vazia, com o painel termoacústico e um resíduo têxtil proveniente da reciclagem de pneus, aplicados na face interior da parede de fachada) e SV1 (sala de aula vazia, sem nenhum tipo de intervenção), para diminuir o tempo de reverberação da sala de aula para o limite do RRAE ($T_{\text{médio}}(500 - 2k \text{ Hz}) = 0,83 \text{ s}$) e para o valor recomendado nesta dissertação ($T_{\text{médio}}(500 - 2k \text{ Hz}) = 0,6 \text{ s}$)

Material	Área mínima a reabilitar em SV2 (m ²)				Área mínima a reabilitar em SV1 (m ²)			
	$T_{\text{médio}}(500 - 2k \text{ Hz}) = 0,83 \text{ s}$	% (*)	$T_{\text{médio}}(500 - 2k \text{ Hz}) = 0,6 \text{ s}$	% (*)	$T_{\text{médio}}(500 - 2k \text{ Hz}) = 0,83 \text{ s}$	% (*)	$T_{\text{médio}}(500 - 2k \text{ Hz}) = 0,6 \text{ s}$	% (**)
CCf posição a)	61	45	113	83	90	67	142	Imp. (**)
TO posição a)	34	25	62	46	50	37	78	58
E posição a)	26	19	48	36	39	28	61	45

CCf - Copos de Café furados na base (diâmetro de 10 mm); TO - Tabuleiros para Ovos; E - Espumas; posição a) - na parte superior das paredes do fundo;

(*) Área mínima necessária a reabilitar da área total de paredes e teto da sala de aula, sem contabilizar a área dos vãos, envidraçados e opacos;

(**) A área necessária a reabilitar para diminuir o tempo de reverberação na situação de referência SV1 para o valor recomendado nesta dissertação ($T_{\text{médio}}(500 - 2k \text{ Hz}) = 0,6 \text{ s}$) é superior à área total de paredes e teto, sem contabilizar a área dos vãos, envidraçados e opacos. Desta forma, conclui-se que é impossível reabilitar a SV1 com CCf na posição a), para um $T_{\text{médio}}(500 - 2k \text{ Hz})$ de 0,6 s.

Como era expectável, pela observação dos valores apresentados no quadro 6.20, verifica-se que a área mínima a reabilitar, tanto na situação de referência SV1 como na SV2, é superior para diminuir o tempo de reverberação para o valor recomendado nesta dissertação ($T_{\text{médio}}(500 - 2\text{k Hz}) = 0,6 \text{ s}$) em comparação com o limite regulamentar presente no RRAE ($T_{\text{médio}}(500 - 2\text{k Hz}) = 0,83 \text{ s}$), que é menos exigente.

É ainda possível concluir, pela análise do quadro 6.20, que a amostra das E, seguida dos TO e dos CCf apresenta as menores percentagens de área de paredes e teto (sem contabilizar os vãos envidraçados e opacos) necessária para reduzir os tempos de reverberação para os valores indicados.

Também se verifica, como esperado, que na situação de referência SV1 a área mínima a reabilitar é superior à área mínima a reabilitar na SV2 (quadro 6.20).

Por fim, a área necessária a reabilitar com CCf para diminuir o tempo de reverberação na situação de referência SV1 para o valor recomendado nesta dissertação ($T_{\text{médio}}(500 - 2\text{k Hz}) = 0,6 \text{ s}$) é superior à área total de paredes e teto da sala de aula, sem contabilizar a área dos vãos, envidraçados e opacos (quadro 6.20). Como tal, conclui-se que é impossível reabilitar a situação de referência SV1 com CCf na posição a), para um $T_{\text{médio}}(500 - 2\text{k Hz})$ de 0,6 s.

Desta forma, conclui-se que é possível corrigir acusticamente uma sala de aula do 1.º ciclo do ensino básico a partir de soluções económicas com recurso a materiais de desperdício.

7

CONCLUSÕES

7.1. SÍNTESE DAS CONCLUSÕES OBTIDAS

As condições acústicas de salas de aula desempenham um papel fundamental no desenvolvimento integral dos estudantes uma vez que aí se privilegia a transmissão de conhecimentos e experiências. Assim, para que o processo de ensino/aprendizagem seja bem-sucedido é essencial que a mensagem chegue com clareza aos estudantes do 1.º ciclo do ensino básico, uma vez que estes são muito jovens e não possuem o vocabulário necessário, bem como capacidade de concentração, para entenderem através de poucas palavras o contexto do que lhes está a ser transmitido pelo professor.

O caso de estudo apresentado nesta dissertação corresponde a uma sala de aula da Escola Básica do 1.º Ciclo de Santiago de Candoso (Guimarães), encerrada devido à falta de condições de conforto térmico e acústico, e é um claro exemplo do efeito prejudicial de um ambiente acústico inadequado.

Ao longo da presente dissertação, abordaram-se os principais conceitos acústicos que são fundamentais para a análise do conforto acústico em salas de aula, realizou-se uma pesquisa sobre os limites praticados relativamente ao tempo de reverberação (T), ao RASTI (*rapid speech transmission index*) e ao ruído de fundo (LAeq(rf)) numa amostra diversa de países e artigos, estudou-se a tipologia das escolas primárias portuguesas e em particular as vantagens da utilização de alguns materiais de desperdício na melhoria do desempenho acústico.

No decorrer deste trabalho realizaram-se sínteses no final de cada capítulo com o intuito de facilitar o encadeamento e a retenção das ideias principais ao leitor. Desta forma, foi possível retirar algumas conclusões que estão apresentadas de seguida:

- Observou-se que os valores aceitáveis para os parâmetros acústicos estudados nas legislações e normalizações dos diferentes países são díspares e em alguns casos inexistentes, o que demonstra a ausência de uniformização nos regulamentos de acústica de edifícios. Assim, indo de encontro a normalizações europeias mais completas, considera-se importante limitar e regulamentar em Portugal não só o tempo de reverberação e o ruído de equipamentos existentes, como também o ruído de fundo e o RASTI (ou outro parâmetro de inteligibilidade da palavra). Nesse sentido, os valores recomendados por este trabalho para salas de aula do 1.º ciclo do ensino básico correspondem a um $T_{\text{médio}} (500 - 2k \text{ Hz})$ entre 0,4 e 0,6 s, LAeq(rf) inferior ou igual a 35 dB e RASTI superior ou igual a 0,75;
- Entre os materiais de desperdício ensaiados (CCf - copos plásticos de café furados na base, TO - tabuleiros para ovos e E - espumas de colchões) as espumas foram as que apresentaram melhores resultados e os copos plásticos de café os piores, o que era expectável devido à significativa porosidade da espuma em contraste com o plástico, que não possui poros abertos que facilitem a absorção sonora;

- Verificou-se que os copos plásticos furados na base com um diâmetro de cerca de 10 mm apresentam coeficientes de absorção sonora maiores ($\alpha_w = 0,30$ e $NRC = 0,30$) do que os copos plásticos sem furos ($\alpha_w = 0,25$ e $NRC = 0,25$). Este acréscimo de absorção era esperado devido ao comportamento dos copos plásticos furados como ressoadores, que permite vantagens na absorção sonora das frequências médias;
- Da situação de referência SV2 (sala de aula vazia, com o painel termoacústico e um resíduo têxtil proveniente da reciclagem de pneus, aplicados na face interior da parede de fachada) para a melhor solução ensaiada com materiais de desperdício, que corresponde à amostra das espumas na posição a) (na parte superior das paredes do fundo), verificou-se uma diminuição do tempo de reverberação de cerca de 0,6 s ($T_{\text{médio}}(500 - 2k \text{ Hz}), SV2 = 1,53 \text{ s}$ e $T_{\text{médio}}(500 - 2k \text{ Hz}), E \text{ posição } a) = 0,94 \text{ s}$) o que resultou num aumento da inteligibilidade da palavra de *suficiente* para *boa*;
- O valor regulamentar português para a sala de aula estudada (com um volume de 168 m^3) corresponde a um $T_{\text{médio}}(500 - 2k \text{ Hz})$ inferior ou igual a 0,83 s e apenas foi verificado, sem a contabilização da incerteza, para a amostra das espumas na posição a) com 22 pessoas sentadas ($T_{\text{médio}}(500 - 2k \text{ Hz}), E \text{ posição } a) \text{ com } 22 \text{ pessoas} = 0,70 \text{ s}$). No entanto, as situações TO na posição a), E na posição a) e E na posição c) (sobre o revestimento de piso) também cumprem o regulamento, ao contabilizar a incerteza de 25% do limite regulamentar;
- Para que os valores do tempo de reverberação para cada material de desperdício na posição a) cumpram o limite do tempo de reverberação presente no RRAE ($T_{\text{médio}}(500 - 2k \text{ Hz}) \leq 0,83 \text{ s}$) na situação de referência SV2 era necessário cerca de 61, 34 e 26 m^2 de CCf, TO e E, respetivamente, o que corresponde a uma percentagem da área de paredes e teto (sem contabilizar os vãos envidraçados e opacos) de 45, 25 e 19%, respetivamente. No entanto, na situação de referência SV1 (sala de aula vazia, sem nenhum tipo de intervenção) seria necessário cerca de 90, 50 e 39 m^2 de CCf, TO e E, respetivamente, o que corresponde a uma percentagem da área de paredes e teto (sem contabilizar os vãos envidraçados e opacos) de 67, 37 e 28%, respetivamente;
- Para reabilitar a sala de aula estudada na situação de referência SV1 para o valor recomendado nesta dissertação ($T_{\text{médio}}(500 - 2k \text{ Hz}) = 0,6 \text{ s}$) verificou-se a necessidade de utilizar cerca de 78 e 61 m^2 de TO e E, respetivamente, o que corresponde a uma percentagem da área de paredes e teto (sem contabilizar os vãos envidraçados e opacos) de 58 e 45%, respetivamente. Relativamente aos CCf, a área necessária a reabilitar para diminuir o tempo de reverberação na situação de referência SV1 para o valor recomendado nesta dissertação é superior à área total de paredes e teto da sala de aula (sem contabilizar os vãos envidraçados e opacos). Como tal, conclui-se que é impossível reabilitar a situação de referência SV1 com CCf na posição a), para um $T_{\text{médio}}(500 - 2k \text{ Hz})$ de 0,6 s;
- O tempo de reverberação na posição a) apresenta melhores resultados relativamente às restantes posições (exemplo: $T_{\text{médio}}(500 - 2k \text{ Hz}), E \text{ posição } a) = 0,94 \text{ s}$, $T_{\text{médio}}(500 - 2k \text{ Hz}), E \text{ posição } b) = 1,05 \text{ s}$ e $T_{\text{médio}}(500 - 2k \text{ Hz}), E \text{ posição } c) = 1,02 \text{ s}$, que corresponde a uma $\Delta T_{\text{médio}}(500 - 2k \text{ Hz}) = 0,08 \text{ s}$). No entanto, a sala ensaiada com os materiais de desperdício corresponde à situação de referência SV2, que já continha materiais absorventes, o que não permitiu o alcance desejado nesta análise, uma vez que a sala na situação de referência SV2 não se encontrava tão reverberante como a sala vazia sem qualquer tipo de intervenção. Assim, não se pode concluir com certeza, dada a imprecisão dos diversos elementos do estudo e algoritmos de cálculo, que o posicionamento das amostras influencia o tempo de reverberação, uma vez que os valores medidos nas três posições variam menos de uma décima de segundo ($\cong 8\%$). Contudo, salienta-se que a colocação dos materiais de correção acústica próximos do teto permite uma maior preservação dos mesmos;

- O ruído de fundo apresentado no interior da sala de aula, desocupada e sem equipamentos em funcionamento, apresenta-se inadequado ($LA_{eq}(rf) \cong 36$ dB) devido ao elevado ruído que existe no exterior da sala ($LA_{eq}(rf) \cong 60$ dB). Assim, verifica-se a necessidade de reduzir o ruído de fundo através de medidas como a adoção de barreiras acústicas ou a colocação de sistemas de abertura adequados nas janelas, para colmatar o problema das frinchas.

Desta forma, comprovou-se a possibilidade de realizar a correção acústica económica de uma sala de aula do 1.º ciclo do ensino básico apenas com recurso a materiais de desperdício.

7.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Ao terminar esta dissertação compreende-se que a utilização de materiais de desperdício é uma possível solução para a melhoria do desempenho acústico de salas de aula. Assim, considera-se pertinente continuar este estudo e nesse sentido apresentam-se de seguida alguns trabalhos futuros que podem clarificar algumas questões para a transposição desse conhecimento para a prática da engenharia civil:

- Procurar desenvolver outros estudos com materiais de desperdício diferentes (da área têxtil, alimentar, entre outras) que permitam aumentar a base de dados dos materiais de desperdício com viabilidade para a correção acústica;
- Após o estudo das condições acústicas dos materiais de desperdício é essencial validar os materiais a outros níveis, como a resistência ao fogo, segurança, saúde e ambiente, higiene e durabilidade;
- Apesar de neste trabalho se terem ensaiado na sala de aula amostras de materiais de desperdício com cerca de 20 m² (devido ao compromisso entre a capacidade de reunir os materiais, de os preparar, transportar e de os aplicar em tempo útil) considera-se útil fazer um estudo com maior área de material, no sentido de concluir acerca da influência do posicionamento das amostras no tempo de reverberação;
- Continuar o desenvolvimento de estudos que analisem a possibilidade de implementar materiais de desperdício noutras localizações das escolas básicas do 1.º ciclo do ensino básico, como nas bibliotecas, cantinas, corredores, entre outros, ou até noutros âmbitos que não em escolas;
- Analisar a possibilidade de uma possível adaptação dos materiais de desperdícios em termos de *design* dado que, no âmbito das escolas do 1.º ciclo do ensino básico, considera-se importante a existência de um ambiente divertido, colorido e acolhedor para as crianças;
- É ainda importante validar a análise numa escola em funcionamento de forma a obter uma opinião dos utilizadores do espaço. A integração dos materiais num contexto escolar em funcionamento permite ainda estudar diferentes soluções relativas à acessibilidade dos materiais, que devem estar protegidos no sentido de prolongar a sua durabilidade. A simplicidade das soluções implementadas possibilita ainda a integração dos estudantes na intervenção das salas de aula, permitindo assim a sensibilização para o reaproveitamento de materiais de desperdício e para a importância da acústica em edifícios.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] C. Europeia. *Efeitos do Ruído na Saúde*. http://ec.europa.eu/environment/noise/health_effects_en.htm acessado a 28 de maio de 2018.
- [2] F. A. Everest e K. C. Pohlmann, *Master Handbook of Acoustics*. McGraw-Hill, 2009.
- [3] H. Kuttruff, *Acoustics: An Introduction*. Taylor & Francis, 2004.
- [4] A. P. O. Carvalho, *Acústica Ambiental e de Edifícios*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2017.
- [5] J. Patrício, *Isolamento Sonoro a Sons Aéreos e de Percussão: Metodologias de caracterização*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 2008.
- [6] P. M. Silva, *Acústica de Edifícios*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1998.
- [7] D. Mateus, *Acústica de Edifícios e Controlo de Ruído*. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, 2008.
- [8] P. M. Silva, *Engenharia Acústica*. Ordem dos Engenheiros, 2007.
- [9] N. Costa. *Lei do Inverso do Quadrado da Distância; Pressão Eficaz*. <http://www.soundzonemagazine.com/2013/10/lei-do-inverso-do-quadrado-da-distancia.html> acessado a 28 de fevereiro de 2018.
- [10] H. Kuttruff, *Room Acoustics*. Taylor & Francis, 2009.
- [11] M. Möser, *Engineering Acoustics: An Introduction to Noise Control*. Springer, 2009.
- [12] Christian-st. *Curvas de Ponderação*. http://chracustica.zip.net/arch2008-09-07_2008-09-13.html acessado a 1 de março de 2018.
- [13] F. Jacobsen, T. Poulsen, J. H. Rindel, A. C. Gade e M. Ohlrich, *Fundamentals of Acoustics and Noise Control*. Technical University of Denmark, 2011.
- [14] N. Nunes, *Fundamentos e Controlo do Ruído*. Centro Universitário do Leste de Minas Gerais, 2006.
- [15] O. Domingues, *A Acústica nos Edifícios: Materiais e Sistemas Absorventes Sonoros*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 2005.
- [16] C. H. Hansen, *Engineering Noise Control*. Mechanical Engineering Department of Adelaide South University, 1988.
- [17] *EN ISO 11654 Acústica. Absorvedores de Som para Uso em Edifícios. Avaliação da Absorção Sonora, Comité Europeu de Normalização, 1997*.
- [18] W. D. Solutions. *WAVE Acoustic Absorber Ceiling*. <https://www.architonic.com/en/product/wave-wave-acoustic-absorber-ceiling/1291668> acessado a 18 de maio de 2018.
- [19] T. E. Vigran, *Building Acoustics*. Taylor & Francis, 2008.
- [20] F. Group. *System by Fantoni*. <https://www.architonic.com/en/product/fantoni-60x60-60x120-system/1049668> acessado a 18 de maio de 2018.
- [21] D. D. Manna. *Projeto Design*. <http://www.arcoweb.com.br/projetodesign/especiais/premio-asbea-2006-banco-santander-01-12-2006> acessado a 20 de julho de 2018.

- [22] L. D. Geetere. *O novo padrão acústico para edifícios escolares (De nieuwe akoestische norm voor schoolgebouwen)*. http://eduandcare.be/wp-content/uploads/2015/10/sessie2_akoestiek-in-schoolgebouwen.pdf acessado a 25 de março de 2018.
- [23] A. C. Isbert, *Diseño Acústico de Espacios Arquitectónicos*. Universidad Politécnica de Cataluña, 1998.
- [24] M. Noll. *Architectural Acoustics - Acceptable Room Sound Levels*. <https://www.archtoolbox.com/representation/architectural-concepts/architectural-acoustics-acceptable-room-levels.html> acessado a 17 de maio de 2018.
- [25] I. K. Souza e P. G. Serrano. *Inteligibilidade*. <http://portalacustica.info/tag/inteligibilidade/> acessado a 9 de março de 2018.
- [26] *Decreto Legislativo Regional n.º 22/83/A (13/05/1983), Poluição sonora, Diário da República*.
- [27] *DL 251/87 (24/06/1987), Regulamento Geral sobre o Ruído, Diário da República*.
- [28] *DL 09/07 (17/01/2007), Regulamento Geral do Ruído, Diário da República*.
- [29] *DL 129/02 (11/05/2002), Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios, Diário da República*.
- [30] *DL 96/08 (09/06/2008), Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios, Diário da República*.
- [31] *Approved Document E: Resistance to the Passage of Sound, Department for Communities and Local Government, Building Regulations (Inglaterra e País de Gales), 2015*.
- [32] *Technical Booklet G: Resistance to the Passage of Sound, Department of Finance and Personnel, Building Regulations (Irlanda do Norte), 2012*.
- [33] *Building Bulletin 93, Acoustic Design of Schools: Performance Standards, Department for Education (Reino Unido), 2015*.
- [34] *Technical Handbook: Non-Domestic, Scottish Ministers, The Building Regulations (Escócia), 2017*.
- [35] A. S. America. *A Brief History of the Acoustical Society of America*. <http://acousticalsociety.org/> acessado a 24 de março de 2018.
- [36] A. S. America, *Classroom Acoustics I. A Resource for Creating Learning Environments with Desirable Listening Conditions*. Acoustical Society of America, 2000.
- [37] *ANSI S12.60 American National Standard Acoustical Performance Criteria, Design Requirements and Guidelines for Schools (Estados Unidos da América), 2002*.
- [38] *ANSI/ASA S12.60/Part 1 American National Standard Acoustical Performance Criteria, Design Requirements and Guidelines for Schools, Part 1: Permanent Schools (Estados Unidos da América), 2010*.
- [39] *ANSI/ASA S12.60/Part 2 American National Standard Acoustical Performance Criteria, Design Requirements and Guidelines for Schools, Part 2: Relocatable Classroom Factors (Estados Unidos da América), 2009*.
- [40] A. S. America, *Classroom Acoustics II. Acoustical Barriers to Learning*. Acoustical Society of America, 2002.
- [41] D. Woolworth e P. Phinney, *Classroom Acoustics for Architects. A Companion Booklet for ANSI/ASA S12.60*. Acoustical Society of America, 2015.

- [42] *Real Decreto 1371/07 de 19 de octubre, Ministerio de la Vivienda, Espanha.*
- [43] *Documento Básico, DB-HR Protección frente al ruido, Código Técnico de la Edificación, Real Decreto, 2009.*
- [44] *Real Decreto 1367/07 de 19 de octubre, Ministerio de la Presidencia, Espanha.*
- [45] *Ley 37/03 del Ruido de 17 de noviembre, Jefatura del Estado, Espanha.*
- [46] *Arrêté du 25 avril relatif à la limitation du bruit dans les établissements d'enseignement, Article 5, Ministère de L'Écologie et du Développement Durable (França), 2003.*
- [47] *PN-B-02151-4 Requisitos para reverberação e inteligibilidade de fala nas salas e diretrizes de teste (Wymagania dotyczące warunków pogłosowych i zrozumiałości mowy w pomieszczeniach oraz wytyczne prowadzenia badań), Instituto de Pesquisa de Edifícios (Polónia), 2015.*
- [48] *Regulamento do Ministro de Infraestrutura e Construção de 14 de novembro de 2017 (Rozporządzenie Ministra Infrastruktury i Budownictwa z dnia 14 listopada 2017), Ministro da Infraestrutura e Construção (Polónia), 2017.*
- [49] M. Jarosz. *Engaging Poland in Discussions Around Their New Acoustic Standard.* <https://www.acousticbulletin.com/engaging-poland-in-discussions-around-their-new-acoustic-standard> acessado a 25 de março de 2018.
- [50] *PN-B-02151-02 Acústica do edifício. Proteção contra o ruído em edifícios. Valores-limite de nível de som. (Akustyka budowlana. Ochrona przed hałasem pomieszczeń w budynkach. Dopuszczalne wartości poziomu dźwięku w pomieszczeniach.), Instituto de Pesquisa de Edifícios (Polónia), 1987.*
- [51] *NBN S 01-400-2 Critérios acústicos para edifícios escolares (Akoestische criteria voor schoolgebouwen), Agência de normalização (Bélgica), 2012.*
- [52] *NS 8175 Condições de som em edifícios, classificação sonora para diferentes tipos de edifícios (Lydforhold i bygninger, Lydklassifisering for ulike bygningstyper), Comité SN/K 001 (Noruega), 2012.*
- [53] D. P. Garcia, B. Rasmussen e J. Brunskog, "Classroom Acoustics Design for Speakers' Comfort and Speech Intelligibility: A European Perspective", *Forum Acusticum*, 2014.
- [54] *Regulamentos de Tecnologia de Construção TEK17 (Byggeteknisk forskrift), Direção de Qualidade da Construção (Noruega), 2017.*
- [55] P. Christoffersen. *Padrão Norueguês: Condições de Som em Edifícios (Norsk Standard: Lydforhold i bygninger).* <http://docplayer.me/4447696-Norsk-standard-lydforhold-i-bygninger.html> acessado a 26 de março de 2018.
- [56] N. Lu, "Avaliações do Índice de Transmissão da Fala em Salas de Aula Construídas de acordo com os Requisitos Técnicos da TEK10," Dissertação de Mestrado, Eng.^a: Civil, Universidade Ambiental e de Biociência da Noruega, 2017.
- [57] B. Shield e J. Dockrell, "The Effects of Noise on Children at School: A Review", *Building Acoustics*, 2003.
- [58] J. Bradley, "Speech Intelligibility Studies in Classrooms", *Institute for Research in Construction*, 1986.
- [59] S. Bistafa e J. Bradley, "Optimum Acoustical Conditions for Speech Intelligibility in Classrooms", *Noise and Vibration Worldwide*, 2000.

- [60] W. Mikulski e J. Radosz, "Acoustics of Classrooms in Primary Schools - Results of the Reverberation Time and the Speech Transmission Index Assessments in Selected Buildings", *Archives of Acoustics*, 2011.
- [61] W. H. Organization. *Dados e estatísticas do ruído*. <http://www.euro.who.int/en/health-topics/environment-and-health/noise/data-and-statistics> acessado a 30 de maio de 2018.
- [62] A. Barreto, C. V. Preto, M. J. V. Rosa, M. C. Lobo e P. Chitas, *A Situação Social em Portugal, 1960-1999. Volume II. Indicadores Sociais em Portugal e na União Europeia*. Imprensa de Ciências Sociais, 2000.
- [63] L. Santos e A. M. R. Cordeiro, "Rede Escolar do 1º Ciclo do Ensino Básico em Portugal: Evolução a Partir de Meados do Século XX e Principais Fatores Condicionantes no Âmbito do Planeamento e Gestão", *Cadernos de Geografia*, 2014.
- [64] R. D. H. Educação. *Os Edifícios Escolares do Plano dos Centenários*. <http://193.137.22.223/pt/patrimonio-educativo/museu-virtual/exposicoes/> acessado a 23 de março de 2018.
- [65] M. L. Rodrigues, *A Escola Pública Pode Fazer a Diferença*. Edições Almedina, 2010.
- [66] M. Educação. *Centro Escolar*. <http://www.centroescolar.min-edu.pt/> acessado a 23 de março de 2018.
- [67] A. M. R. Cordeiro e H. A. Martins, "A Carta Educativa Municipal como Instrumento Estratégico de Reorganização da Rede Educativa: Tendências de Mudança", *Cadernos de Geografia*, 2013.
- [68] D. G. E. E. Ciência. *Estabelecimentos de ensino que ministram o ensino básico, por ciclo de estudos e natureza do estabelecimento de ensino, em Portugal (2000/01 a 2015/16)*. http://w3.dgeec.mec.pt/dse/eef/indicadores/Indicador_3_14.asp acessado a 22 de março de 2018.
- [69] L. R. Lopes, "Reabilitação Sustentável de Edifícios de Ensino Básico", *Repositório das Universidades Lusíada*, 2011.
- [70] J. Gomes, M. R. Ribeiro e C. Aquino, "Reabilitação Acústica de um Pequeno Auditório", *Congresso Acústica Guimarães*, 2004.
- [71] J. M. Andrade, "Caracterização do Conforto Acústico em Escolas," Dissertação de Mestrado, Eng.ª: Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2009.
- [72] M. I. S. Menezes, "Caracterização Acústica Interior de Edifícios Escolares Reabilitados: O Caso da Escola Secundária Rodrigues de Freitas," Dissertação de Mestrado, Eng.ª: Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2010.
- [73] C. Buratti, E. Belloni, E. Lascaro, G. A. Lopez e P. Ricciardi, "Sustainable Panels with Recycled Materials for Building Applications: Environmental and Acoustic Characterization", *Energy Procedia*, 2016.
- [74] R. Rey, J. Alba, J. Ramis e V. Sanchis, "Nuevos Materiales Absorbentes Acústicos Obtenidos a Partir de Restos de Botellas de Plástico", *Materiales de Construcción*, 2011.
- [75] R. Rey, J. Alba, J. Arenas e V. Sanchis, "An Empirical Modelling of Porous Sound Absorbing Materials Made of Recycled Foam", *Applied Acoustics*, 2012.
- [76] S. C. P. Vieira, "Caracterização Acústica de Suportes Alveolares de Armazenamento e Transporte de Géneros Alimentares," Dissertação de Mestrado, Eng.ª: Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2014.

- [77] S. Secchi, F. Asdrubali, G. Cellai, E. Nannipieri, A. Rotili e I. Vannucchi, "Experimental and Environmental Analysis of New Sound-absorbing and Insulating Elements in Recycled Cardboard", *Journal of Building Engineering*, 2016.
- [78] F. Yildiz, A. G. Parlar, Z. Parlar e M. Bakkal, "Properties of Sound Panels Made from Recycled Footwear Treads", *Acta Physica Polonica A*, 2017.
- [79] M. Fesina, A. Krasnov e L. Gorina, "On Different Engineering Ideas of Eco-designer Resource-saving Studies of Effective Sound-absorbing Substances and Noise-reducing Constructions", *Procedia Engineering*, 2017.
- [80] F. Asdrubali, "Survey on the Acoustical Properties of New Sustainable Materials for Noise Control", 2006.
- [81] F. M. Nedeff, N. Bârsan e A. L. Fînaru, "Studies and Research Concerning the Use of Some Recyclable Absorbent Materials for Increasing Acoustic Comfort Into a Room Designed for Speaking", *Scientific Study and Research*, 2017.
- [82] Pladur. *Gama de Produtos Pladur*. <https://www.pladur.com/pt-arquitectos/documentacao/DocumentosTecnicos/> acessado a 1 de junho de 2018.
- [83] S. T. I. E. Renováveis. *BASWAphon - Sistema acústico contínuo para tetos e paredes*. <http://stier-acustica.com/Ficheiros.ashx?i=11847> acessado a 1 de junho de 2018.
- [84] M. Reynolds. *Earthship Global*. <https://www.earthshipglobal.com/> acessado a 14 de abril de 2018.
- [85] G. Maps. *Vista Aérea da Escola Básica do 1.º Ciclo de Santiago de Candoso (Guimarães) e da Zona Envolvente*. <https://www.google.pt/maps/@41.4289804,-8.3234377,306m/data=!3m1!1e3> acessado a 27 de maio de 2018
- [86] D. E. Civil. *Civil TN*. <https://civilin7.wixsite.com/decivil> acessado a 17 de abril de 2018.
- [87] J. V. Pinheiro. *NaturDecoTech: Painéis Termoacústicos e Decorativos em Couro*. <http://www.naturdecotech.com/> acessado a 16 de abril de 2018.
- [88] M. Marques, "Melhoria do Desempenho Térmico de uma Sala de Aula com Materiais de Desperdício," Dissertação de Mestrado, Eng.º: Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2018.
- [89] *NP EN ISO 354 Acústica. Medição da Absorção Sonora em Câmara Reverberante, Comité Europeu de Normalização, 2007.*
- [90] *NP EN ISO 3382-1 Acústica. Medição dos parâmetros acústicos de uma sala. Parte 1: Performance de Espaços, Comité Europeu de Normalização, 2009.*
- [91] *IEC 60268-16 Equipamento do sistema de som. Parte 16: Classificação objetiva da inteligibilidade da palavra pelo STI, 2011.*

Anexo A

REGISTO FOTOGRÁFICO DA EXECUÇÃO DAS AMOSTRAS

FOLHA DE REGISTO FOTOGRÁFICO DA EXECUÇÃO DAS AMOSTRAS

Data de início: 28/02/2018

Data de fim: 09/03/2018



Figura A.1 - Colagem dos copos de café às placas de cartão com cola branca e colocação de tabuleiros para ovos a fazer pressão para facilitar a fixação



Figura A.2 - Colagem dos tabuleiros para ovos às placas de cartão com cola branca e colocação de uma mesa a fazer pressão para facilitar a fixação



Figura A.3 - Corte e colagem das espumas às placas de cartão com cola branca e colocação de uma mesa a fazer pressão para facilitar a fixação



Figura A.4 - Colagem dos copos para café com a colaboração dos estudantes do *Civil'in*



Figura A.5 - Transporte das amostras até à Escola Básica do 1.º Ciclo de Santiago de Candoso (Guimarães)

Observação: após a colagem dos materiais de desperdício às placas de cartão, colocaram-se por cima destas, placas já finalizadas com o intuito de as pressionarem de forma contínua e distribuída. Depois de concluída a execução das amostras, as placas permaneceram imóveis aproximadamente 24 h para garantir a fixação dos materiais.

Anexo B

REGISTO DOS RESULTADOS OBTIDOS NA CÂMARA REVERBERANTE

FOLHA DE MEDIÇÕES REALIZADAS NA CÂMARA REVERBERANTE

Data: 05/03/2018

Local: Laboratório de Acústica da FEUP



Figura B.1 - Ensaio realizado na câmara reverberante do Laboratório de Acústica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (LAfeup)

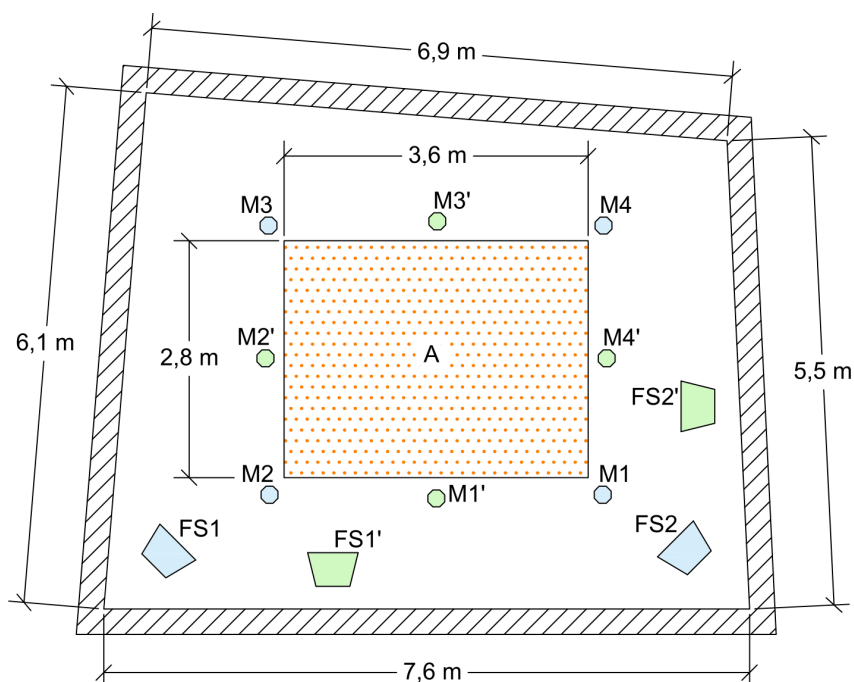


Figura B.2 - Planta esquemática da câmara reverberante do Laboratório de Acústica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (LAfeup), com a amostra (A), as duas posições das fontes sonoras (FSi e FSi') e as duas posições dos microfones (Mi e Mi') assinaladas

Quadro B.1 - Resultados do tempo de reverberação (T) medido na câmara reverberante, para a situação de referência (câmara vazia), para a câmara com os copos de café (CC), com os copos de café furados na base (CCf), com os tabuleiros para ovos (TO) e com as espumas (E), em função da frequência

Frequência (Hz)	T medido na câmara reverberante (s)				
	Referência	CC	CCf	TO	E
100	10,77	8,68	8,52	8,02	6,20
125	11,02	8,74	8,92	7,99	6,02
160	9,55	7,77	8,07	8,05	5,44
200	8,91	7,09	7,72	7,60	4,35
250	9,17	7,14	7,09	6,53	3,98
315	9,50	7,40	6,59	5,61	3,32
400	9,46	7,16	4,56	3,85	3,11
500	9,98	6,89	4,53	3,69	2,86
630	10,00	5,35	5,01	3,64	2,76
800	9,16	5,28	4,40	2,88	2,57
1 000	8,55	5,01	4,94	2,69	2,45
1 250	7,50	3,83	4,23	2,84	2,38
1 600	6,82	3,55	3,66	2,96	2,31
2 000	6,00	3,31	3,30	2,80	2,20
2 500	5,12	3,42	3,35	2,55	2,06
3 150	4,30	3,54	3,50	2,39	1,88
4 000	3,41	2,88	2,76	2,07	1,68
5 000	2,61	2,21	2,19	1,69	1,46

Anexo C

REGISTO DOS RESULTADOS OBTIDOS NA SALA DE AULA

FOLHA DE MEDIÇÕES REALIZADAS NA SALA DE AULA

Data: 06/02/2018

Local: Escola Básica do 1.º Ciclo de Santiago de Candoso (Guimarães)

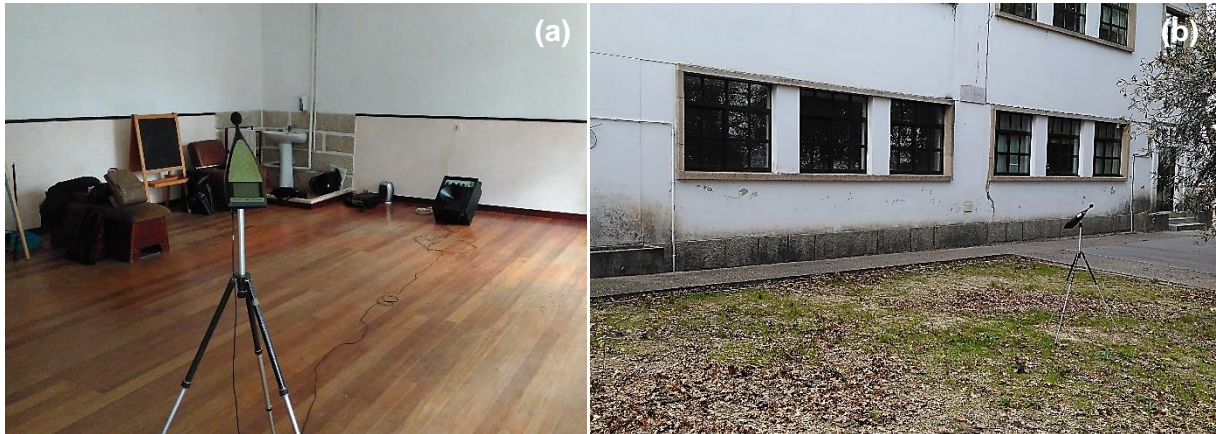


Figura C.1 - Medição do ruído de fundo: (a) no interior da sala de aula; (b) no exterior da sala de aula

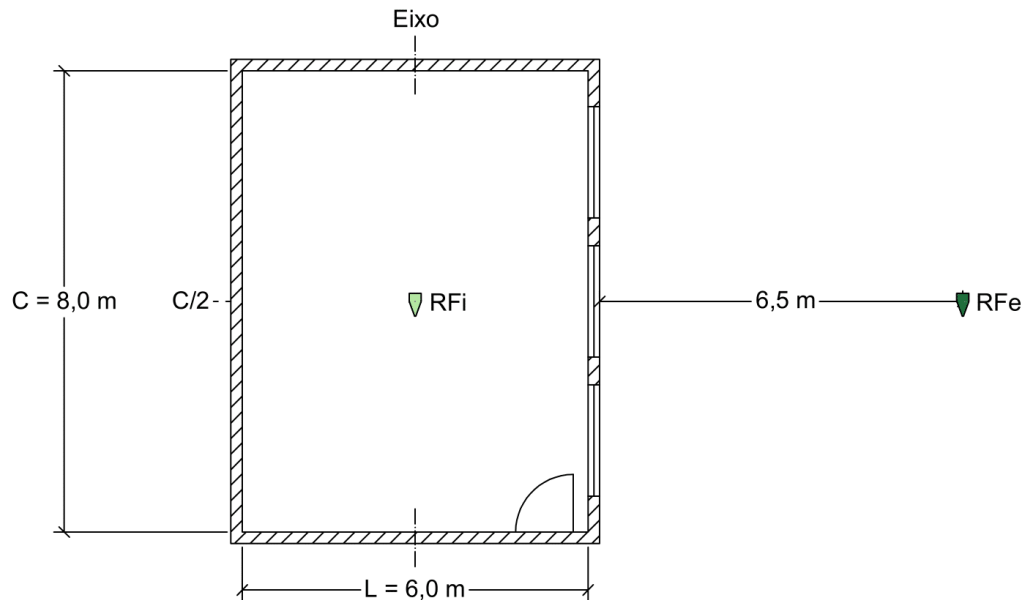


Figura C.2 - Planta esquemática da sala de aula, com as posições de medição do ruído de fundo no interior (RFi) e no exterior da sala (RFe) assinaladas

Quadro C.1 - Resultados do ruído de fundo medido no interior (RFi) e no exterior (RFe) da sala de aula

Pontos de medição	Frequência (Hz)									$L_{Aeq}(rf)$ (dB)
	31,5	63	125	250	500	1 000	2 000	4 000	8 000	
RFi	40,7	42,9	37,4	36,0	32,5	31,8	27,2	18,7	16,5	35,8
RFe	60,4	62,9	57,7	56,3	56,8	55,6	53,1	48,1	45,3	60,2

FOLHA DE MEDIÇÕES REALIZADAS NA SALA DE AULA

Data: 12/03/2018

Local: Escola Básica do 1.º Ciclo de Santiago de Candoso (Guimarães)

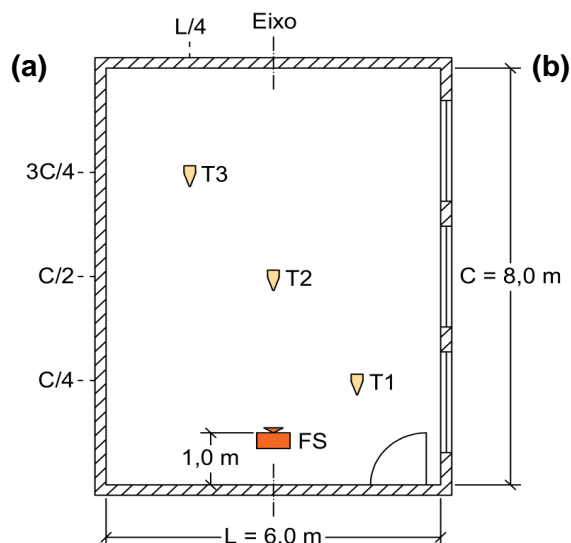


Figura C.3 - (a) Medição do tempo de reverberação na situação de referência SV1 (sala vazia, sem nenhum tipo de intervenção); (b) planta esquemática da sala de aula, com a posição da fonte sonora (FS) e as diferentes posições medidas pelo sonómetro (T1, T2 e T3) assinaladas

Quadro C.2 - Resultados do tempo de reverberação na situação de referência SV1 (sala vazia, sem nenhum tipo de intervenção), para as duas leituras realizadas em cada posição do sonómetro (T1, T2 e T3), em função da frequência

Frequência (Hz)	T1 (s)		T2 (s)		T3 (s)	
	1	2	3	4	5	6
100	4,12	3,69	3,39	3,31	3,52	3,63
125	2,82	2,90	2,32	3,07	2,81	3,76
160	2,55	2,96	2,79	2,75	2,36	2,94
200	1,87	1,43	2,03	1,98	1,81	1,84
250	1,89	1,76	2,18	2,00	2,16	2,30
315	2,49	2,60	2,90	2,70	2,74	2,89
400	2,72	2,68	2,85	2,56	2,80	2,68
500	2,26	2,30	2,56	2,34	2,41	2,77
630	2,33	2,61	2,58	2,41	2,61	2,58
800	2,64	2,44	2,49	2,36	2,46	2,39
1 000	2,47	2,20	2,54	2,50	2,54	2,54
1 250	2,45	2,32	2,59	2,46	2,47	2,52
1 600	2,43	2,41	2,65	2,46	2,57	2,64
2 000	2,43	2,49	2,50	2,55	2,63	2,55
2 500	2,39	2,41	2,40	2,45	2,51	2,40
3 150	2,23	2,24	2,28	2,46	2,34	2,32
4 000	2,06	2,06	2,09	2,02	2,07	2,09
5 000	1,75	1,77	1,84	1,85	1,82	1,79

FOLHA DE MEDIÇÕES REALIZADAS NA SALA DE AULA

Data: 12/03/2018

Local: Escola Básica do 1.º Ciclo de Santiago de Candoso (Guimarães)

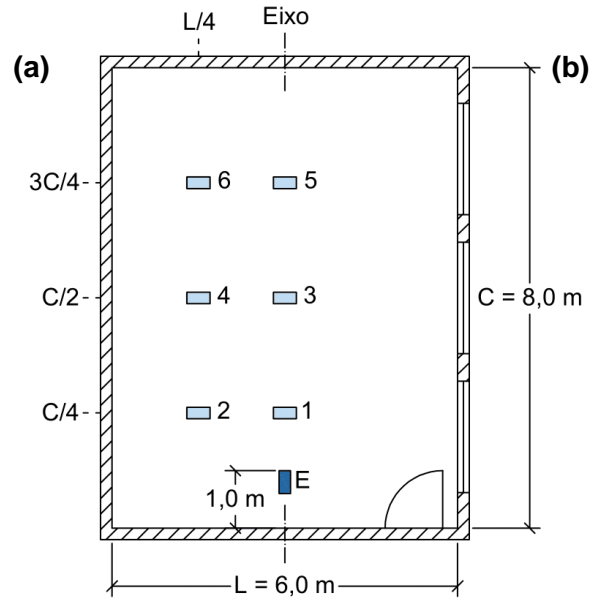


Figura C.4 - (a) Medição do RASTI (*rapid speech transmission index*) na situação de referência SV1 (sala vazia, sem nenhum tipo de intervenção); (b) planta esquemática da sala de aula, com a posição do emissor (E) e as diferentes posições do recetor do RASTI (1, 2, 3, 4, 5 e 6) assinaladas

Quadro C.3 - Resultados do RASTI (*rapid speech transmission index*) na situação de referência SV1 (sala vazia, sem nenhum tipo de intervenção), em função dos pontos de medição (1, 2, 3, 4, 5 e 6)

Pontos de medição	Medições			
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a
1	0,50	0,52	0,51	0,53
2	0,44	0,43	0,43	0,44
3	0,44	0,43	0,43	0,44
4	0,40	0,40	0,41	0,39
5	0,39	0,41	0,40	0,41
6	0,37	0,38	0,38	0,36

FOLHA DE MEDIÇÕES REALIZADAS NA SALA DE AULA

Data: 14/03/2018

Local: Escola Básica do 1.º Ciclo de Santiago de Candoso (Guimarães)

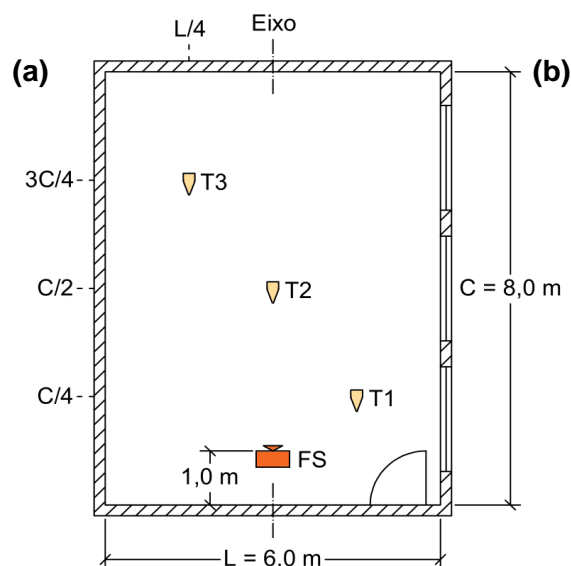


Figura C.5 - (a) Medição do tempo de reverberação na situação de referência SV2 (sala de aula vazia, com o painel termoacústico e um resíduo têxtil proveniente da reciclagem de pneus, aplicados na face interior da parede de fachada); (b) planta esquemática da sala de aula, com a posição da fonte sonora (FS) e as diferentes posições medidas pelo sonómetro (T1, T2 e T3) assinaladas

Quadro C.4 - Resultados do tempo de reverberação na situação de referência SV2 (sala de aula vazia, com o painel termoacústico e um resíduo têxtil proveniente da reciclagem de pneus, aplicados na face interior da parede de fachada), para as duas leituras realizadas em cada posição do sonómetro (T1, T2 e T3), em função da frequência

Frequência (Hz)	T1 (s)		T2 (s)		T3 (s)	
	1	2	3	4	5	6
100	2,16	2,52	2,59	3,22	2,53	2,83
125	2,11	1,91	2,31	2,17	2,38	2,46
160	1,90	1,78	1,65	1,54	2,13	1,57
200	1,32	1,30	1,32	1,28	1,12	1,21
250	1,48	1,59	1,35	1,42	1,44	1,82
315	1,96	1,62	1,73	1,57	2,29	2,21
400	1,84	2,01	1,86	1,71	1,75	1,94
500	1,76	1,94	1,79	1,82	1,73	1,95
630	1,47	1,67	1,57	1,52	1,60	1,45
800	1,39	1,45	1,41	1,40	1,57	1,53
1 000	1,41	1,32	1,31	1,43	1,44	1,36
1 250	1,41	1,34	1,31	1,35	1,37	1,34
1 600	1,37	1,54	1,49	1,44	1,50	1,45
2 000	1,44	1,46	1,46	1,50	1,55	1,45
2 500	1,48	1,34	1,45	1,36	1,40	1,46
3 150	1,46	1,32	1,32	1,34	1,36	1,35
4 000	1,24	1,26	1,30	1,30	1,31	1,33
5 000	1,12	1,18	1,13	1,15	1,12	1,11

FOLHA DE MEDIÇÕES REALIZADAS NA SALA DE AULA

Data: 14/03/2018

Local: Escola Básica do 1.º Ciclo de Santiago de Candoso (Guimarães)

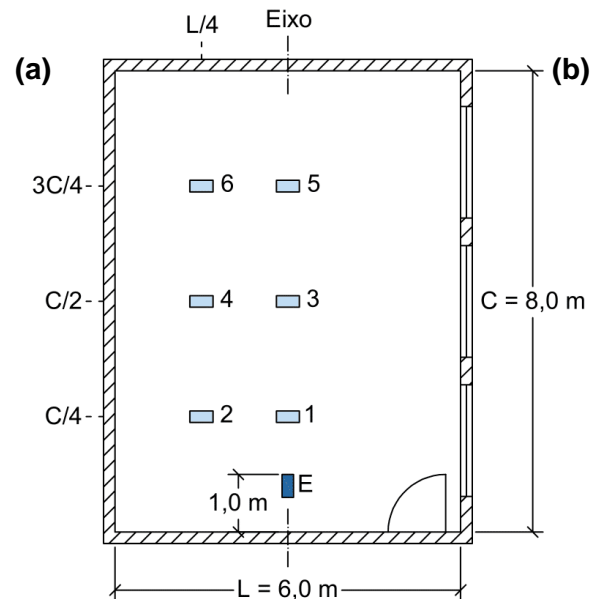


Figura C.6 - (a) Medição do RASTI (*rapid speech transmission index*) na situação de referência SV2 (sala de aula vazia, com o painel termoacústico e um resíduo têxtil proveniente da reciclagem de pneus, aplicados na face interior da parede de fachada); (b) planta esquemática da sala de aula, com a posição do emissor (E) e as diferentes posições do recetor do RASTI (1, 2, 3, 4, 5 e 6) assinaladas

Quadro C.5 - Resultados do RASTI (*rapid speech transmission index*) na situação de referência SV2 (sala de aula vazia, com o painel termoacústico e um resíduo têxtil proveniente da reciclagem de pneus, aplicados na face interior da parede de fachada), em função dos pontos de medição (1, 2, 3, 4, 5 e 6)

Pontos de medição	Medições			
	1ª	2ª	3ª	4ª
1	0,64	0,63	0,65	0,64
2	0,56	0,56	0,54	0,54
3	0,57	0,59	0,58	0,59
4	0,54	0,54	0,53	0,55
5	0,52	0,54	0,52	0,52
6	0,51	0,50	0,51	0,50

FOLHA DE MEDIÇÕES REALIZADAS NA SALA DE AULA

Data: 14/03/2018

Local: Escola Básica do 1.º Ciclo de Santiago de Candoso (Guimarães)

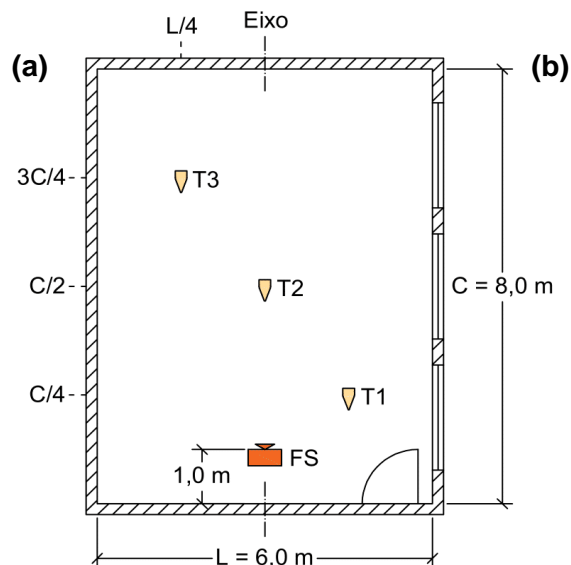


Figura C.7 - (a) Medição do tempo de reverberação com a amostra dos copos de café furados na base na posição a) (na parte superior das paredes do fundo); (b) planta esquemática da sala de aula, com a posição da fonte sonora (FS) e as diferentes posições medidas pelo sonómetro (T1, T2 e T3) assinaladas

Quadro C.6 - Resultados do tempo de reverberação com a amostra dos copos de café furados na base na posição a) (na parte superior das paredes do fundo), para as duas leituras realizadas em cada posição do sonómetro (T1, T2 e T3), em função da frequência

Frequência (Hz)	T1 (s)		T2 (s)		T3 (s)	
	1	2	3	4	5	6
100	2,24	2,81	2,31	1,91	2,57	2,71
125	1,81	1,81	1,87	1,85	2,08	1,73
160	1,57	1,51	1,67	1,54	1,45	1,71
200	1,19	1,18	1,21	1,25	1,26	1,14
250	1,38	1,16	1,03	1,13	1,13	1,32
315	1,43	1,19	1,25	1,29	1,20	1,30
400	1,42	1,57	1,50	1,46	1,27	1,66
500	1,71	1,33	1,54	1,21	1,29	1,43
630	1,39	1,61	1,16	1,31	1,53	1,35
800	1,19	1,12	1,01	1,00	1,14	1,12
1 000	1,01	1,01	1,04	0,94	0,92	1,00
1 250	0,98	1,07	1,02	0,95	1,02	0,99
1 600	1,16	1,22	1,03	1,14	1,16	1,10
2 000	1,17	1,22	1,17	1,05	1,15	1,09
2 500	1,22	1,30	1,25	1,23	1,21	1,21
3 150	1,25	1,32	1,14	1,24	1,26	1,22
4 000	1,07	1,10	1,10	1,05	1,05	1,06
5 000	0,90	0,93	0,96	0,92	0,93	0,88

FOLHA DE MEDIÇÕES REALIZADAS NA SALA DE AULA

Data: 14/03/2018

Local: Escola Básica do 1.º Ciclo de Santiago de Candoso (Guimarães)

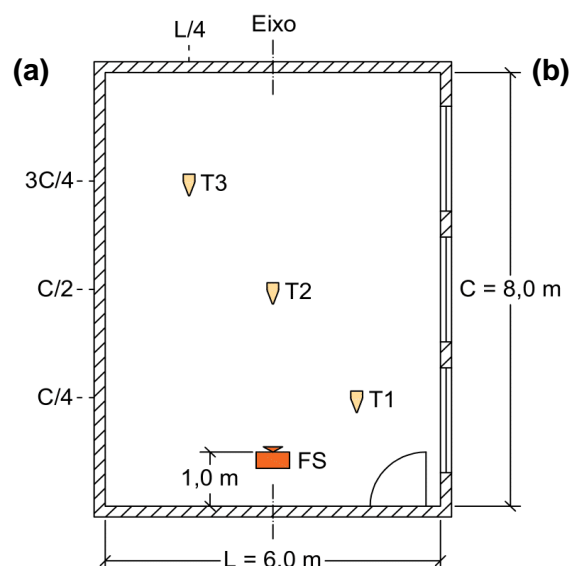


Figura C.8 - Medição do tempo de reverberação com a amostra dos copos de café furados na base na posição b) (encostados na longitudinal à base das paredes); (b) planta esquemática da sala de aula, com a posição da fonte sonora (FS) e as diferentes posições medidas pelo sonómetro (T1, T2 e T3) assinaladas

Quadro C.7 - Resultados do tempo de reverberação com a amostra dos copos de café furados na base na posição b) (encostados na longitudinal à base das paredes), para as duas leituras realizadas em cada posição do sonómetro (T1, T2 e T3), em função da frequência

Frequência (Hz)	T1 (s)		T2 (s)		T3 (s)	
	1	2	3	4	5	6
100	2,20	2,01	2,15	1,89	1,97	2,32
125	1,67	1,80	1,81	1,83	1,99	1,75
160	1,05	1,24	1,66	1,27	1,75	1,55
200	1,11	1,05	0,96	0,90	1,00	1,20
250	0,97	1,17	1,37	1,07	1,09	1,11
315	1,73	1,38	1,35	1,27	1,13	1,27
400	1,30	1,25	1,11	1,14	1,33	1,14
500	1,17	1,17	1,13	1,28	1,18	1,20
630	1,15	1,34	1,29	1,37	1,40	1,26
800	1,12	1,44	1,19	1,34	1,28	1,32
1 000	1,04	1,03	1,08	1,08	1,23	1,24
1 250	0,96	1,09	1,14	1,24	1,15	1,23
1 600	1,04	1,11	1,11	1,18	1,13	1,20
2 000	1,18	1,26	1,28	1,36	1,30	1,36
2 500	1,29	1,26	1,31	1,29	1,29	1,28
3 150	1,32	1,32	1,26	1,27	1,18	1,27
4 000	1,13	1,20	1,20	1,26	1,16	1,23
5 000	1,00	1,00	1,03	1,03	1,02	1,02

FOLHA DE MEDIÇÕES REALIZADAS NA SALA DE AULA

Data: 14/03/2018

Local: Escola Básica do 1.º Ciclo de Santiago de Candoso (Guimarães)

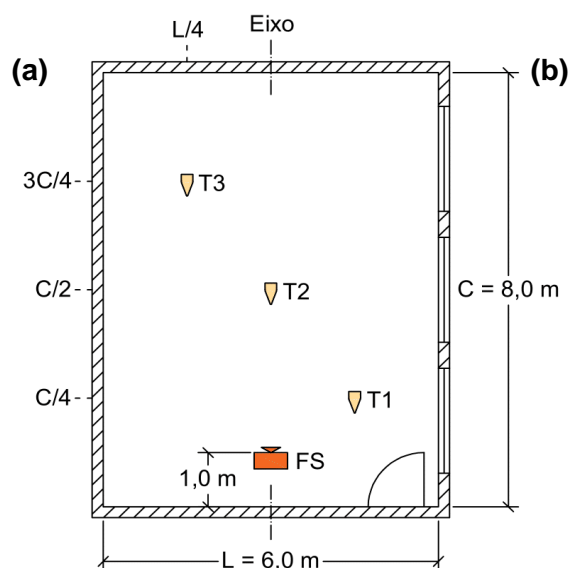


Figura C.9 - Medição do tempo de reverberação com a amostra dos copos de café furados na base na posição c) (sobre o revestimento de piso); (b) planta esquemática da sala de aula, com a posição da fonte sonora (FS) e as diferentes posições medidas pelo sonómetro (T1, T2 e T3) assinaladas

Quadro C.8 - Resultados do tempo de reverberação com a amostra dos copos de café furados na base na posição c) (sobre o revestimento de piso), para as duas leituras realizadas em cada posição do sonómetro (T1, T2 e T3), em função da frequência

Frequência (Hz)	T1 (s)		T2 (s)		T3 (s)	
	1	2	3	4	5	6
100	2,06	2,14	2,93	2,61	2,19	2,74
125	1,69	1,76	1,93	1,70	2,21	1,91
160	1,69	1,57	1,77	1,46	1,84	1,45
200	1,11	1,11	1,13	1,28	1,35	1,20
250	1,42	1,62	1,11	1,28	1,29	1,24
315	1,38	1,57	1,49	1,48	1,53	1,48
400	1,12	1,33	1,15	1,24	1,10	1,16
500	1,37	1,24	1,36	1,26	1,16	1,27
630	1,27	1,49	1,29	1,34	1,15	1,07
800	1,25	1,40	1,29	1,31	1,61	1,73
1 000	1,20	1,16	1,41	1,46	1,24	1,54
1 250	1,09	1,06	1,00	1,14	1,10	1,02
1 600	1,31	1,33	1,03	1,18	1,26	1,20
2 000	1,07	1,08	1,14	1,21	1,19	1,11
2 500	1,01	1,09	1,14	1,12	1,13	1,13
3 150	1,09	1,06	1,25	1,16	1,18	1,21
4 000	1,00	1,00	1,08	1,03	1,02	1,05
5 000	0,85	0,94	0,90	0,89	0,92	0,91

FOLHA DE MEDIÇÕES REALIZADAS NA SALA DE AULA

Data: 14/03/2018

Local: Escola Básica do 1.º Ciclo de Santiago de Candoso (Guimarães)

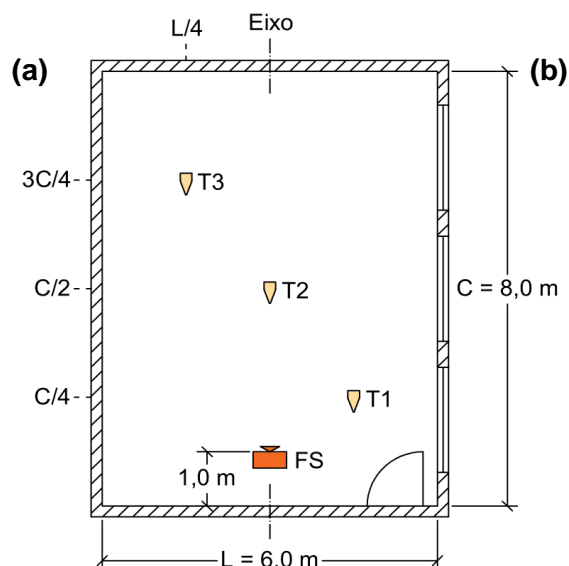


Figura C.10 - Medição do tempo de reverberação com a amostra dos tabuleiros para ovos na posição a) (na parte superior das paredes do fundo); (b) planta esquemática da sala de aula, com a posição da fonte sonora (FS) e as diferentes posições medidas pelo sonómetro (T1, T2 e T3) assinaladas

Quadro C.9 - Resultados do tempo de reverberação com a amostra dos tabuleiros para ovos na posição a) (na parte superior das paredes do fundo), para as duas leituras realizadas em cada posição do sonómetro (T1, T2 e T3), em função da frequência

Frequência (Hz)	T1 (s)		T2 (s)		T3 (s)	
	1	2	3	4	5	6
100	2,32	1,90	1,89	1,83	2,03	2,26
125	1,83	1,80	1,86	2,26	1,84	1,95
160	1,71	2,11	1,46	1,87	1,51	1,33
200	1,19	1,42	1,35	1,08	1,19	1,15
250	1,28	0,98	1,24	1,41	1,05	1,27
315	1,20	1,36	1,60	1,52	1,41	1,53
400	1,47	1,33	1,46	1,26	1,78	1,28
500	1,22	1,33	1,20	1,40	1,35	1,05
630	0,77	0,99	0,82	1,07	1,00	1,05
800	0,86	0,77	0,73	0,88	1,02	1,02
1 000	0,81	0,86	0,75	0,79	0,90	0,73
1 250	0,81	0,79	0,86	0,98	0,88	0,89
1 600	1,02	0,97	1,07	0,93	0,99	1,14
2 000	1,23	1,22	1,27	1,14	1,06	1,05
2 500	1,04	0,94	1,06	1,03	0,94	1,15
3 150	0,97	0,97	0,94	0,91	0,97	0,96
4 000	0,92	0,90	0,93	0,97	1,02	0,99
5 000	0,83	0,80	0,83	0,80	0,78	0,77

FOLHA DE MEDIÇÕES REALIZADAS NA SALA DE AULA

Data: 14/03/2018

Local: Escola Básica do 1.º Ciclo de Santiago de Candoso (Guimarães)

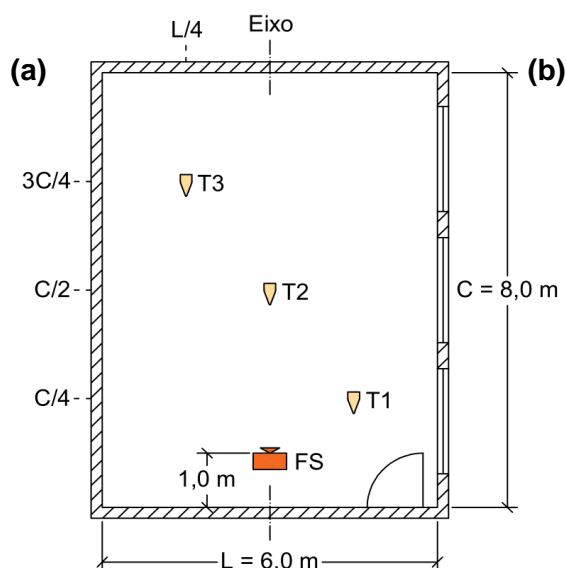
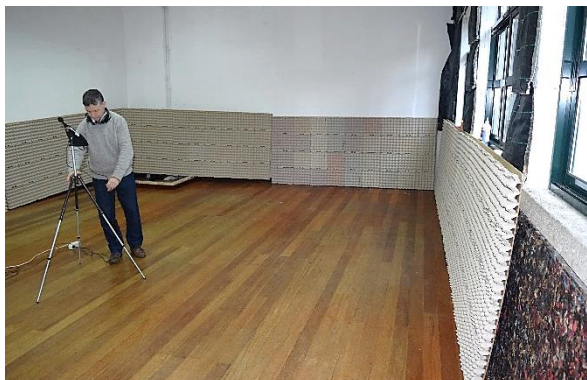


Figura C.11 - Medição do tempo de reverberação com a amostra dos tabuleiros para ovos na posição b) (encostados na longitudinal à base das paredes); (b) planta esquemática da sala de aula, com a posição da fonte sonora (FS) e as diferentes posições medidas pelo sonómetro (T1, T2 e T3) assinaladas

Quadro C.10 - Resultados do tempo de reverberação com a amostra dos tabuleiros para ovos na posição b) (encostados na longitudinal à base das paredes), para as duas leituras realizadas em cada posição do sonómetro (T1, T2 e T3), em função da frequência

Frequência (Hz)	T1 (s)		T2 (s)		T3 (s)	
	1	2	3	4	5	6
100	2,02	2,14	1,93	2,27	2,36	2,08
125	1,54	1,78	1,47	1,90	1,91	1,91
160	1,39	1,29	1,22	1,20	1,38	1,61
200	1,06	0,99	0,97	1,09	0,85	0,85
250	1,55	1,35	1,18	1,15	1,12	1,10
315	1,36	1,30	1,23	1,13	1,46	1,48
400	1,15	1,13	1,19	1,11	1,28	1,30
500	1,08	1,36	1,28	1,14	1,18	1,21
630	1,00	1,03	1,01	0,98	0,95	1,09
800	1,03	1,16	1,19	1,14	0,99	1,07
1 000	1,09	0,87	1,01	0,94	1,07	1,24
1 250	0,98	1,00	0,97	1,09	1,02	1,00
1 600	1,01	1,08	1,10	1,10	1,24	1,04
2 000	1,20	1,15	1,25	1,29	1,22	1,22
2 500	1,17	1,11	1,22	1,18	1,13	1,12
3 150	1,03	1,02	1,14	1,09	1,19	1,09
4 000	1,00	1,02	1,08	1,06	1,06	1,03
5 000	0,89	0,87	0,90	0,90	0,92	0,88

FOLHA DE MEDIÇÕES REALIZADAS NA SALA DE AULA

Data: 14/03/2018

Local: Escola Básica do 1.º Ciclo de Santiago de Candoso (Guimarães)

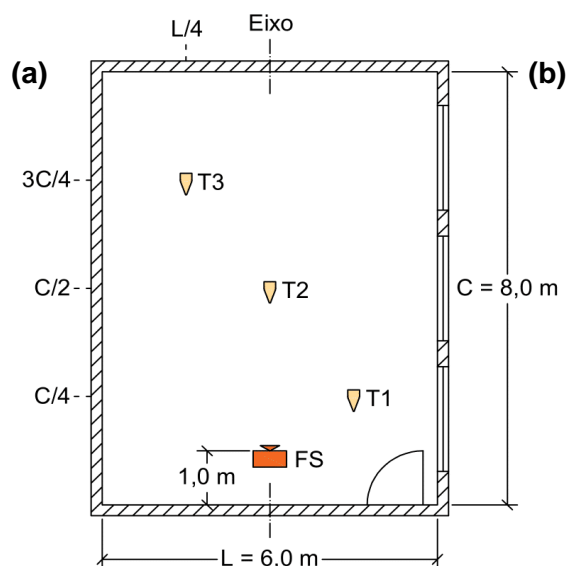


Figura C.12 - Medição do tempo de reverberação com a amostra dos tabuleiros para ovos na posição c) (sobre o revestimento de piso); (b) planta esquemática da sala de aula, com a posição da fonte sonora (FS) e as diferentes posições medidas pelo sonómetro (T1, T2 e T3) assinaladas

Quadro C.11 - Resultados do tempo de reverberação com a amostra dos tabuleiros para ovos na posição c) (sobre o revestimento de piso), para as duas leituras realizadas em cada posição do sonómetro (T1, T2 e T3), em função da frequência

Frequência (Hz)	T1 (s)		T2 (s)		T3 (s)	
	1	2	3	4	5	6
100	2,52	2,43	2,05	2,69	3,19	2,97
125	2,10	2,08	1,98	2,01	1,93	1,74
160	1,69	1,49	1,44	1,26	1,60	1,24
200	1,14	0,95	1,03	1,24	1,02	1,20
250	1,23	1,29	1,17	1,27	1,37	1,16
315	1,12	1,22	1,20	1,01	1,28	1,08
400	1,37	1,15	1,18	1,21	1,16	1,24
500	1,07	1,18	1,24	1,17	1,18	1,02
630	0,87	0,92	1,21	0,99	0,90	0,99
800	1,10	0,89	0,97	0,87	1,18	1,14
1 000	0,79	0,94	1,19	1,25	1,09	1,15
1 250	1,08	1,00	0,97	1,03	0,96	0,95
1 600	1,16	1,01	1,38	1,01	1,07	0,96
2 000	1,03	1,09	1,14	1,18	1,10	1,07
2 500	0,92	0,96	0,86	1,04	1,05	0,93
3 150	1,04	0,93	0,90	0,98	0,98	0,98
4 000	0,91	0,91	0,84	0,94	0,94	0,89
5 000	0,76	0,77	0,75	0,73	0,76	0,75

FOLHA DE MEDIÇÕES REALIZADAS NA SALA DE AULA

Data: 14/03/2018

Local: Escola Básica do 1.º Ciclo de Santiago de Candoso (Guimarães)

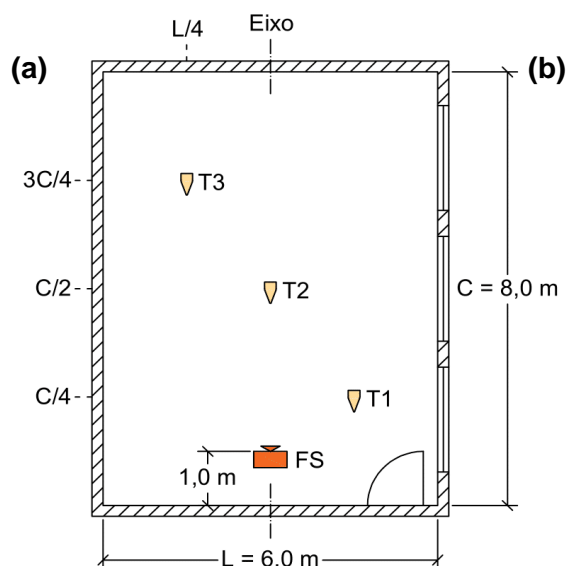


Figura C.13 - Medição do tempo de reverberação com a amostra das espumas na posição a) (na parte superior das paredes do fundo); (b) planta esquemática da sala de aula, com a posição da fonte sonora (FS) e as diferentes posições medidas pelo sonómetro (T1, T2 e T3) assinaladas

Quadro C.12 - Resultados do tempo de reverberação com a amostra das espumas na posição a) (na parte superior das paredes do fundo), para as duas leituras realizadas em cada posição do sonómetro (T1, T2 e T3), em função da frequência

Frequência (Hz)	T1 (s)		T2 (s)		T3 (s)	
	1	2	3	4	5	6
100	1,53	1,82	1,84	1,85	1,79	1,87
125	1,80	1,28	1,47	1,41	1,67	1,61
160	1,32	1,37	1,44	1,21	1,30	1,31
200	1,00	1,21	0,90	0,67	0,83	0,90
250	0,96	0,96	0,67	0,80	0,77	0,73
315	1,07	0,86	0,84	0,99	0,96	0,98
400	0,87	0,97	0,88	0,89	1,00	0,83
500	0,97	1,09	0,97	0,94	0,90	0,73
630	0,82	1,08	1,16	1,22	0,93	0,77
800	0,76	0,75	0,95	0,89	0,84	0,85
1 000	0,91	0,71	0,79	0,76	0,82	0,68
1 250	0,82	0,73	0,83	0,96	0,76	0,94
1 600	1,14	1,21	1,32	1,11	1,16	1,02
2 000	1,00	1,05	1,16	1,11	1,01	0,95
2 500	0,86	1,01	0,85	0,94	0,92	0,92
3 150	0,88	0,92	0,80	0,75	0,83	0,80
4 000	0,87	0,80	0,80	0,77	0,77	0,74
5 000	0,74	0,74	0,70	0,71	0,80	0,81

FOLHA DE MEDIÇÕES REALIZADAS NA SALA DE AULA

Data: 14/03/2018

Local: Escola Básica do 1.º Ciclo de Santiago de Candoso (Guimarães)

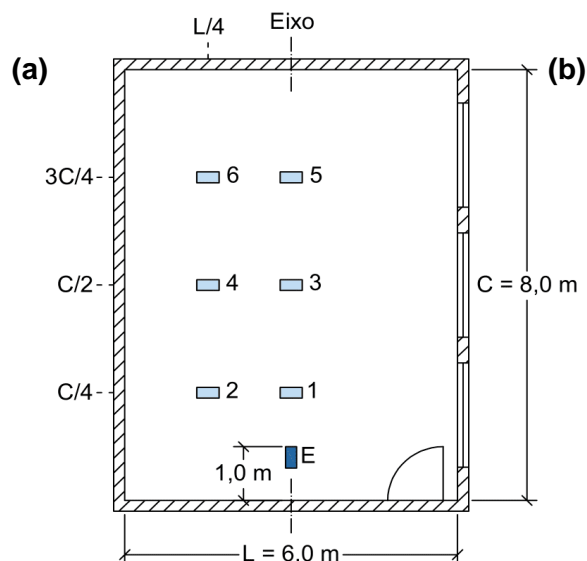
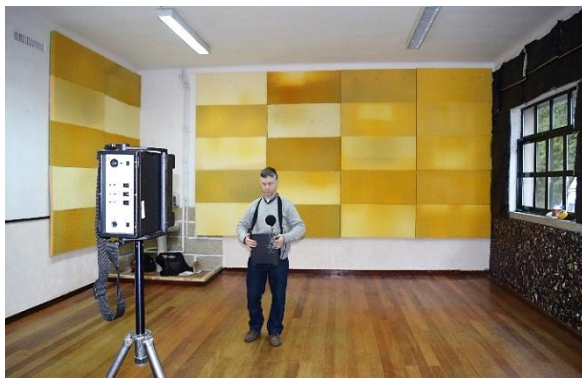


Figura C.14 - (a) Medição do RASTI (*rapid speech transmission index*) com a amostra das espumas na posição a) (na parte superior das paredes do fundo); (b) planta esquemática da sala de aula, com a posição do emissor (E) e as diferentes posições do recetor do RASTI (1, 2, 3, 4, 5 e 6) assinaladas

Quadro C.13 - Resultados do RASTI (*rapid speech transmission index*) com a amostra das espumas na posição a) (na parte superior das paredes do fundo), em função dos pontos de medição (1, 2, 3, 4, 5 e 6)

Pontos de medição	Medições			
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a
1	0,80	0,79	0,78	0,79
2	0,74	0,75	0,74	0,74
3	0,74	0,75	0,73	0,74
4	0,71	0,69	0,68	0,71
5	0,72	0,70	0,71	0,72
6	0,68	0,69	0,67	0,67

FOLHA DE MEDIÇÕES REALIZADAS NA SALA DE AULA

Data: 14/03/2018

Local: Escola Básica do 1.º Ciclo de Santiago de Candoso (Guimarães)

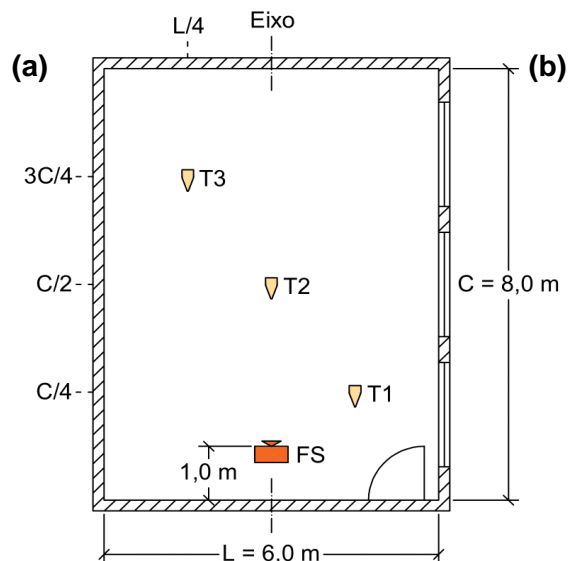


Figura C.15 - Medição do tempo de reverberação com a amostra das espumas na posição b) (encostadas na longitudinal à base das paredes); (b) planta esquemática da sala de aula, com a posição da fonte sonora (FS) e as diferentes posições medidas pelo sonómetro (T1, T2 e T3) assinaladas

Quadro C.14 - Resultados do tempo de reverberação com a amostra das espumas na posição b) (encostadas na longitudinal à base das paredes), para as duas leituras realizadas em cada posição do sonómetro (T1, T2 e T3), em função da frequência

Frequência (Hz)	T1 (s)		T2 (s)		T3 (s)	
	1	2	3	4	5	6
100	1,23	1,28	1,23	1,48	1,30	1,14
125	1,25	1,22	1,31	0,96	1,12	0,97
160	1,20	0,75	0,90	0,86	0,96	1,06
200	0,70	0,79	0,87	0,89	0,85	0,90
250	0,73	0,82	0,77	0,83	0,87	0,93
315	0,71	1,32	1,00	0,85	0,91	1,22
400	1,05	1,14	1,09	1,01	1,04	0,92
500	1,09	0,97	1,07	1,24	1,28	1,18
630	1,26	1,21	1,20	1,01	1,06	0,93
800	1,06	1,06	1,02	0,98	0,94	1,22
1 000	0,80	0,90	1,07	0,91	0,93	0,91
1 250	0,84	0,87	0,93	0,95	0,97	1,02
1 600	1,12	1,03	0,90	1,15	1,17	1,13
2 000	1,13	1,19	1,11	1,17	1,19	1,16
2 500	0,99	1,04	0,96	0,99	1,06	1,08
3 150	0,94	1,01	0,96	0,92	1,00	0,98
4 000	0,80	0,93	0,87	0,91	0,95	0,93
5 000	0,76	0,79	0,77	0,81	0,83	0,82

FOLHA DE MEDIÇÕES REALIZADAS NA SALA DE AULA

Data: 14/03/2018

Local: Escola Básica do 1.º Ciclo de Santiago de Candoso (Guimarães)

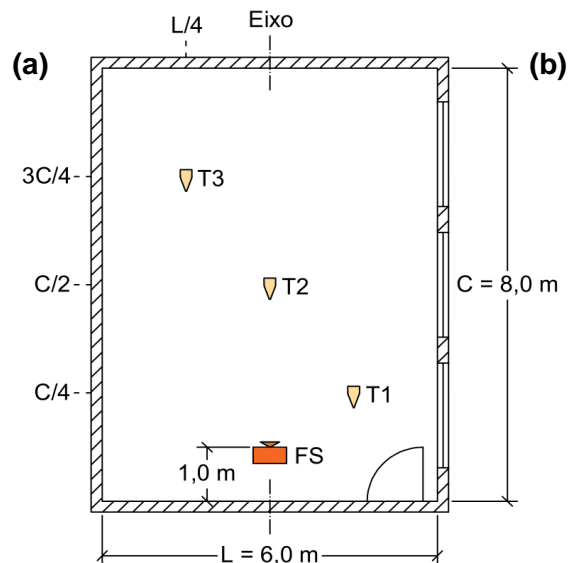


Figura C.16 - Medição do tempo de reverberação com a amostra das espumas na posição c) (sobre o revestimento de piso); (b) planta esquemática da sala de aula, com a posição da fonte sonora (FS) e as diferentes posições medidas pelo sonómetro (T1, T2 e T3) assinaladas

Quadro C.15 - Resultados do tempo de reverberação com a amostra das espumas na posição c) (sobre o revestimento de piso), para as duas leituras realizadas em cada posição do sonómetro (T1, T2 e T3), em função da frequência

Frequência (Hz)	T1 (s)		T2 (s)		T3 (s)	
	1	2	3	4	5	6
100	1,70	1,75	1,73	1,51	1,72	1,90
125	1,46	1,86	1,48	1,51	1,24	1,50
160	1,27	1,24	1,21	1,10	1,04	1,46
200	0,80	0,93	0,74	0,84	0,80	0,92
250	0,94	0,93	0,92	0,86	0,98	0,98
315	0,74	0,87	0,97	0,90	1,02	0,99
400	0,96	1,22	1,40	1,01	1,00	1,00
500	1,25	1,01	1,05	0,92	0,92	0,97
630	0,89	1,01	0,90	0,98	1,08	0,90
800	0,89	0,81	0,95	0,90	0,92	1,18
1 000	1,22	1,05	0,79	0,92	1,02	0,98
1 250	1,10	0,99	0,94	0,88	0,93	1,23
1 600	1,09	1,17	0,99	1,18	1,17	1,13
2 000	1,19	1,06	1,24	0,95	0,90	1,21
2 500	0,88	0,95	0,96	0,86	0,84	0,95
3 150	0,83	0,85	0,80	0,78	0,80	0,88
4 000	0,72	0,74	0,73	0,80	0,73	0,94
5 000	0,65	0,71	0,73	0,73	0,74	0,73

FOLHA DE MEDIÇÕES REALIZADAS NA SALA DE AULA

Data: 14/03/2018

Local: Escola Básica do 1.º Ciclo de Santiago de Candoso (Guimarães)

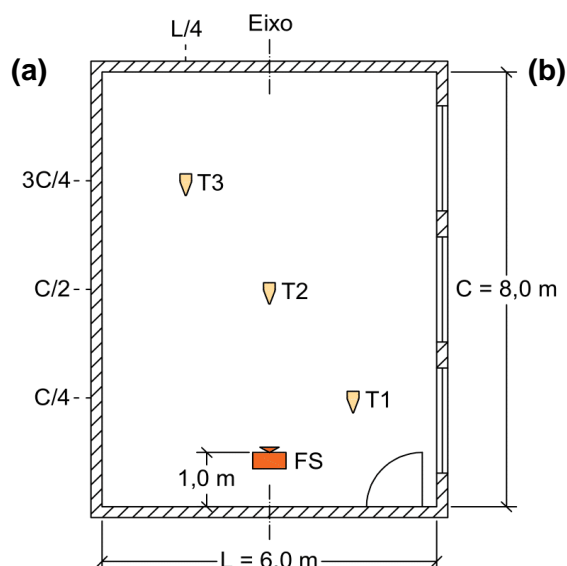


Figura C.17 - Medição do tempo de reverberação com a amostra das espumas na posição a) (na parte superior das paredes do fundo) com 22 pessoas sentadas; (b) planta esquemática da sala de aula, com a posição da fonte sonora (FS) e as diferentes posições medidas pelo sonómetro (T1, T2 e T3) assinaladas

Quadro C.16 - Resultados do tempo de reverberação com a amostra das espumas na posição a) (na parte superior das paredes do fundo) com 22 pessoas sentadas, para as duas leituras realizadas em cada posição do sonómetro (T1, T2 e T3), em função da frequência

Frequência (Hz)	T1 (s)		T2 (s)		T3 (s)	
	1	2	3	4	5	6
100	1,48	1,52	1,43	1,76	1,59	1,63
125	1,31	1,08	1,14	1,21	1,17	1,30
160	1,14	1,16	1,28	0,91	1,09	0,90
200	0,90	0,97	1,06	0,91	0,88	0,81
250	0,72	0,68	0,61	0,70	0,64	0,62
315	0,87	0,84	0,71	0,86	0,80	0,59
400	0,69	0,60	0,58	1,14	0,68	0,71
500	0,97	0,73	0,67	0,81	0,75	0,80
630	0,80	0,75	0,83	0,76	0,91	1,05
800	0,57	0,68	0,62	0,62	0,71	0,63
1 000	0,62	0,62	0,59	0,58	0,67	0,63
1 250	0,60	0,67	0,62	0,65	0,56	0,61
1 600	0,74	0,99	0,68	0,68	0,79	0,68
2 000	0,79	0,69	0,59	0,54	0,65	0,64
2 500	0,70	0,77	0,62	0,55	0,60	0,62
3 150	0,61	0,75	0,58	0,57	0,56	0,57
4 000	0,65	0,66	0,56	0,51	0,54	0,54
5 000	0,58	0,57	0,51	0,52	0,56	0,56

