

# **CARACTERIZAÇÃO ACÚSTICA INTERIOR DE EDIFÍCIOS ESCOLARES REABILITADOS**

**O CASO DA ESCOLA SECUNDÁRIA RODRIGUES DE  
FREITAS, PORTO**

**MARIA INÊS ALVES ANTUNES SARAIVA DE MENEZES**

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

JULHO DE 2010

## **MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2009/2010**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ [miec@fe.up.pt](mailto: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](mailto: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 - 2009/2010 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2010.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respectivo 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 electrónica fornecida pelo respectivo Autor.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao concluir este trabalho gostaria de agradecer ao Professor Doutor António Pedro Oliveira de Carvalho, orientador desta tese, pelo interesse e disponibilidade sempre demonstrados, pelas sugestões dadas e revisão pormenorizada deste documento.

Ao Eng. António Eduardo Costa pelo cuidado e dedicação na realização das medições acústicas.

À *Parque Escolar, EPE*, pela disponibilização de elementos de apoio fundamentais para uma boa caracterização da intervenção efectuada na Escola Secundária Rodrigues de Freitas.

À direcção da Escola Secundária Rodrigues de Freitas e aos seus funcionários que de alguma forma auxiliaram na realização das medições acústicas, pela facilidade no acesso e ajuda dispensadas.

Por fim agradeço aos meus pais e irmã pelo apoio sempre prestado.



## RESUMO

O presente trabalho pretende caracterizar a qualidade acústica de escolas secundárias após recente reabilitação, com um caso específico de estudo.

No âmbito do programa de modernização de escolas do ensino secundário levado a cabo pelo Ministério da Educação e posto em prática pela *Parque Escolar, EPE*, são muitas as escolas que foram, estão a ser e serão, alvo de reabilitações profundas. Desta forma, neste trabalho, é dada particular atenção às escolas reabilitadas.

Nas salas de aula a voz é o principal meio de transmissão de conhecimento, sendo por isso fundamental garantir a perfeita compreensão entre alunos e professor, ou seja, uma boa inteligibilidade da palavra. São apresentados os principais parâmetros de medição da inteligibilidade da palavra, assim como as fontes de ruído que afectam a acústica das salas de aula. Uma vez que se trata de um problema grave que pode ter sérias implicações no futuro dos alunos, são ainda discutidos os efeitos nocivos que uma sala com má acústica pode ter na aprendizagem e comportamento dos alunos, bem como no bem-estar dos docentes.

Um pouco por todo o Mundo a preocupação com as condições dos espaços escolares acentua-se, havendo programas de modernização do parque escolar em muitos países. Em termos de condições acústicas, essa preocupação traduz-se nas normas e documentos de apoio recentemente elaborados relativos à acústica dos espaços, onde são definidos valores limite para os diferentes parâmetros acústicos como o tempo de reverberação e o isolamento sonoro a ruídos de condução aérea e de percussão. Para além do programa português, neste trabalho são apresentados os programas de renovação de escolas em vigor nos Estados Unidos da América, Inglaterra, Austrália e Escócia e são analisados os limites regulamentares dos parâmetros acústicos estabelecidos para edifícios escolares em diferentes países.

É analisado um caso específico de um edifício escolar reabilitado (Escola Secundária Rodrigues de Freitas, antiga D. Manuel II no Porto), apresentando-se uma visão global da intervenção efectuada na escola e os principais aspectos do projecto de condicionamento acústico executado.

Foram realizadas medições acústicas *in situ* dos níveis de pressão sonora e do tempo de reverberação segundo os ensaios descritos nas normas (NP EN 140-4, NP EN 140-5, NP EN 140-7, NP EN ISO 16032 e EN ISO 3382) com o objectivo de calcular, para as salas estudadas, o índice de isolamento sonoro a ruídos de condução aérea ( $D_{nT,w}$ ), o índice de isolamento sonoro a ruídos de condução aérea da fachadas ( $D_{2m,nT,w}$ ), o índice de isolamento a ruídos de percussão ( $L'_{nT,w}$ ), o tempo de reverberação médio nas frequências de 500, 1000 e 2000 Hz, o nível de avaliação do ruído particular de equipamentos ( $L_{Ar,nT}$ ) e as classificações NC e NR do ruído dos equipamentos.

Todos os parâmetros são comparados com os limites estabelecidos no regulamento e com semelhantes medições efectuadas antes da intervenção. As melhorias ao nível do isolamento sonoro entre salas são significativas, passando, por exemplo,  $D_{nT,w}$  de 44 dB para 49 dB e  $L'_{nT,w}$  de 78 dB para 64 dB. Todos os valores obtidos verificam os limites presentes no actual RRAE relativos a edifícios escolares.

Os tempos de reverberação das salas reabilitadas estudadas situam-se entre os 0,88 s e os 0,99 s. Apesar de não excederem os valores regulamentares, ainda são valores um pouco elevados tendo em conta os tempos de reverberação recomendados para alcançar uma boa inteligibilidade da palavra (entre 0,5 s e 0,8 s). O limite recomendado de 35 dB(A) para o ruído de fundo, tal como os limites máximos recomendados das curvas de incomodidade NC e NR, não são respeitados apenas numa das quatro salas estudadas.

**PALAVRAS-CHAVE:** Escolas, reabilitação, acústica, tempo de reverberação, ruído de fundo.



## **ABSTRACT**

The present work aims to characterize the acoustic quality of secondary schools after recent rehabilitation, with a specific case study.

Under the modernization program of secondary schools conducted by the Ministry of Education and implemented by *Parque Escolar, EPE*, there are many schools that were, are and will be, the target of deep restorations. Thus, in this work is given particular attention to rehabilitated schools.

In classrooms the voice is the principal mean of knowledge transmission being therefore essential to ensure a perfect understanding between students and teacher, that is, good speech intelligibility. The main measurement parameters of speech intelligibility are presented as well as noise sources that affect classroom acoustics. Since this is a serious problem that can have serious implications on students' future, are also discussed the adverse effects that a room with poor acoustics may have on students' learning and behavior as well as on the welfare of teachers.

All over the World concern with school places' conditions increases, with school facilities modernization programs being implemented in many countries. In terms of acoustics conditions, that concern is reflected in the acoustic standards and guidelines recently elaborated, which specify limit values for the various acoustics parameters such as reverberation time and airborne and impact sound insulation. Besides the Portuguese program, this paper presents the school renovation programs implemented in the United States of America, England, Australia and Scotland and are discussed the acoustic parameters regulatory limits for school buildings established in different countries.

It is analyzed a special case of a rehabilitated school building (Escola Secundária Rodrigues de Freitas, former D. Manuel II in Porto) presenting an overview of the intervention carried out at school and the main aspects of the proposed acoustic project.

Sound pressure levels and reverberation time measurements were performed *in situ* according to the tests described in the standards (EN NP 140-4, EN NP 140-5, EN NP 140-7, EN NP ISO 16032 and EN ISO 3382) to calculate, for the studied classrooms, the airborne sound insulation rate ( $D_{nT,w}$ ), the impact sound insulation rate ( $L'_{nT,w}$ ), the airborne sound insulation rate of façades ( $D_{2m,nT,w}$ ), the average reverberation time in the 500, 1000 and 2000 Hz frequency bands, the equipment noise level ( $L_{Ar,nT}$ ) and the NC and NR rating of equipment noise.

All parameters are compared with the limits established by regulation and with similar measurements made before intervention. The improvements of sound insulation between rooms are meaningful, varying, for example,  $D_{nT,w}$  of 44 dB for 49 dB and  $L'_{nT,w}$  of 78 dB for 64 dB. All obtained values verify the boundaries present in the current RRAE related with school buildings.

The reverberation times of studied rehabilitated classrooms lie between 0,88 s and 0,99 s. Although do not exceed the regulatory values, are still somewhat high considering the recommended reverberation times to achieve good speech intelligibility (from 0,5 to 0,8 s). The recommended limit of 35 dB(A) for background noise as the recommended maximum of NC and NR rating are not respected in only one of the four studied rooms.

**KEYWORDS:** Schools, rehabilitation, acoustics, reverberation time, background noise.





## ÍNDICE GERAL

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	i
<b>RESUMO</b> .....	iii
<b>ABSTRACT</b> .....	v
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	1
1.1. ENQUADRAMENTO E OBJECTIVOS .....	1
1.2. ESTRUTURA .....	2
<b>2. CONCEITOS ACÚSTICOS</b> .....	3
2.1. CONCEITOS TEÓRICOS BÁSICOS .....	3
2.2. ABSORÇÃO SONORA .....	8
2.3. TEMPO DE REVERBERAÇÃO .....	10
2.4. ISOLAMENTO SONORO .....	11
2.4.1. INTRODUÇÃO .....	11
2.4.2. RUÍDOS DE CONDUÇÃO AÉREA .....	12
2.4.3. RUÍDOS DE PERCUSSÃO .....	14
<b>3. INTELIGIBILIDADE DA PALAVRA</b> .....	17
3.1. INTRODUÇÃO .....	17
3.2. PARÂMETROS DE MEDIDA DA INTELIGIBILIDADE DA PALAVRA .....	18
3.3. FONTES DE RUÍDO .....	21
3.4. EFEITOS DA ACÚSTICA NAS SALAS .....	25
<b>4. REABILITAÇÃO DE ESCOLAS</b> .....	31
4.1. CARACTERIZAÇÃO DO PARQUE ESCOLAR EM PORTUGAL .....	31
4.2. PROGRAMA DE MODERNIZAÇÃO DAS ESCOLAS .....	35
4.2.1. PORTUGAL .....	35
4.2.2. OUTROS PAÍSES .....	37

<b>5. LEGISLAÇÃO</b>	41
<b>5.1. PORTUGAL</b>	41
<b>5.2. OUTROS PAÍSES</b>	43
5.2.1. REINO UNIDO	43
5.2.2. ESTADOS UNIDOS DA AMÉRICA	47
5.2.3. NOVA ZELÂNDIA	50
<b>5.3. COMPARAÇÃO ENTRE PAÍSES</b>	52
<b>6. ESCOLA SECUNDÁRIA RODRIGUES DE FREITAS</b>	55
<b>6.1. CARACTERIZAÇÃO</b>	55
<b>6.2. INTERVENÇÃO EFECTUADA</b>	58
6.2.1. ASPECTOS GERAIS	58
6.2.2. PROJECTO DE CONDICIONAMENTO ACÚSTICO	63
<b>7. MEDIÇÕES ACÚSTICAS</b>	67
<b>7.1. METODOLOGIA</b>	67
7.1.1. MÉTODO	67
7.1.2. EQUIPAMENTO	72
<b>7.2. RESULTADOS</b>	72
7.2.1. ESCOLA ANTIGA	72
7.2.2. ESCOLA REABILITADA	74
<b>7.3. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS</b>	81
7.3.1. ISOLAMENTO SONORO	81
7.3.2. TEMPO DE REVERBERAÇÃO	87
7.3.3. RUÍDO DE FUNDO E RUÍDO DE EQUIPAMENTOS	89
<b>7.4. COMPARAÇÃO DO EFEITO DA REABILITAÇÃO</b>	94
<b>8. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS</b>	97
<b>8.1. CONCLUSÕES</b>	97
<b>8.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS</b>	99
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	101

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Relação entre potência sonora, intensidade sonora e pressão sonora [1] .....	4
Figura 2.2 – Escala de pressão sonora ( $\mu\text{Pa}$ ) e de níveis de pressão sonora (dB) [2].....	5
Figura 2.3 – Espectros sonoros do mesmo ruído em bandas de 1/1 oitava e 1/3 de oitava [1] .....	6
Figura 2.4 – Comportamento dos três tipos de materiais e sistemas absorventes em função da frequência [1] .....	8
Figura 2.5 – Campo directo (azul) e campo reverberado (laranja) em diferentes pontos da sala [3] .....	9
Figura 2.6 – Valores ideais do tempo de reverberação médio nas frequências de 500 e 1000 Hz em função do uso [1] .....	11
Figura 2.7 – Propagação do ruído por via directa (TD) ou por via marginal (TM) [adaptado de 5] .....	11
Figura 2.8 – Transmissão dos ruídos de condução aérea [1] .....	12
Figura 2.9 – Curva de referência para ruídos de condução aérea para o cálculo de $R_w$ , $D_{nT,w}$ e $D_{2m,nT,w}$ e para bandas de frequência de oitava [6].....	13
Figura 2.10 – Soluções de tratamento do isolamento sonoro a ruídos de condução aérea: aumento da massa do elemento separador e duplicação de paramentos [1].....	14
Figura 2.11 – Transmissão dos ruídos de percussão [1] .....	14
Figura 2.12 – Curva de referência para ruídos de percussão para o cálculo de $L'_{nT,w}$ e para bandas de frequência de oitava [7].....	15
Figura 2.13 – Diferentes formas de incremento do isolamento sonoro a ruídos de percussão: revestimento do piso com alcatifa, tecto falso na zona inferior da laje e laje flutuante [1].....	16
Figura 3.1 – Propagação da voz humana por frequências [1] .....	17
Figura 3.2 – Diferentes fontes de ruído interno, externo e de equipamentos que afectam as escolas [9].....	21
Figura 3.3 – Fontes de ruído interno e de equipamentos [adaptado de 9].....	22
Figura 3.4 – Ruído do tráfego rodoviário e ferroviário [adaptado de 10] .....	22
Figura 3.5 – Sistema de ventilação numa sala da Escola Secundária Rodrigues de Freitas [fotografia da autora] .....	23
Figura 3.6 – Curvas NC [11] .....	24
Figura 3.7 – Curvas NR [12] .....	24
Figura 3.8 – Evolução dos resultados dos testes de leitura levados a cabo em 14 escolas dos EUA com crianças de 9 e 12 anos em função do nível de pressão sonora do ruído de fundo ponderado com o filtro C [adaptado de 17] .....	26
Figura 3.9 – Percentagem de respostas correctas a testes de reconhecimento de palavras de crianças de 5 anos, 7 anos e adultos em quatro ambientes de audibilidade diferentes ( $AI = 0,2$ , baixa audibilidade até $AI = 0,8$ , elevada audibilidade) [adaptado de 18] .....	26

Figura 3.10 – Comparação dos resultados dos testes de compreensão de palavras e frases efectuados em salas com tempos de reverberação distintos, em duas escolas na Alemanha [adaptado de 20].....	27
Figura 3.11 – Média da classificação subjectiva do incómodo do ruído, da compreensão da palavra e do conforto acústico em 13 salas de aula em Itália [adaptado de 24] .....	28
Figura 3.12 – Tendência média dos resultados dos testes de reconhecimento de palavras efectuados por crianças de 6, 8 e 11 anos em função da relação sinal/ruído e a respectiva intersecção com a linha de 95 % de respostas correctas [adaptado de 25] .....	29
Figura 4.1 – Liceu Passos Manuel em Lisboa [27] .....	31
Figura 4.2 – Escola Secundária Rodrigues de Freitas no Porto [fotografia da autora] .....	32
Figura 4.3 – Escola Secundária Carlos Amarante em Braga [30] .....	33
Figura 4.4 – Escola Secundária Inês de Castro em Vila Nova de Gaia [31] .....	34
Figura 4.5 – Plano de implementação do Programa de Modernização das Escolas Destinadas ao Ensino Secundário [32] .....	35
Figura 4.6 – Organização e articulação dos sectores funcionais da escola de acordo com o Programa de Modernização das Escolas Destinadas ao Ensino Secundário [28].....	37
Figura 4.7 – Escola rehabilitada em Bradford, Inglaterra [42] .....	38
Figura 5.1 – Três soluções de paredes divisórias com placas de gesso cartonado em ordem crescente do isolamento sonoro: (a) uma placa de gesso cartonado em cada lado, (b) duas de placas de gesso cartonado em cada lado com isolamento de fibra de vidro, (c) duas placas de gesso cartonado em cada lado com isolamento de fibra de vidro com apoios distintos [adaptado de 57].....	47
Figura 5.2 – Concepção acústica ideal de uma sala de aula segundo o <i>Classroom Acoustics</i> : tecto com material absorvente excepto no meio e na frente da sala, onde tem superfícies reflectoras, paredes com materiais absorventes e piso com alcatifa [adaptado de 57] .....	48
Figura 5.3 – Exemplo de dois mecanismos de absorção variável que permitem alterar as características acústicas de uma sala [adaptado de 58].....	48
Figura 6.1 – Escola Secundária Rodrigues de Freitas no Porto [61].....	55
Figura 6.2 – Planta da Escola Secundária Rodrigues de Freitas (sem escala) [65].....	56
Figura 6.3 – Fachada do corpo central da Escola Secundária Rodrigues de Freitas [61] .....	56
Figura 6.4 – Vista aérea da Escola Secundária Rodrigues de Freitas numa fase inicial da obra (2007) [66].....	57
Figura 6.5 – Auditório das novas instalações para o Conservatório de Música do Porto [61] .....	59
Figura 6.6 – Novo edifício construído para albergar algumas valências do Conservatório de Música do Porto [61].....	59
Figura 6.7 – Recreio da Escola Secundária Rodrigues de Freitas [67].....	60
Figura 6.8 – Novo pavilhão gimno-desportivo da Escola Secundária Rodrigues de Freitas [61].....	60
Figura 6.9 – Organização funcional dos pisos 1, 2, 3 da Escola Secundária Rodrigues de Freitas [adaptado de 68] .....	61

Figura 6.10 – Organização funcional do piso 0 da Escola Secundária Rodrigues de Freitas [adaptado de 68] .....	61
Figura 6.11 – Organização funcional do piso -1 da Escola Secundária Rodrigues de Freitas [adaptado de 68] .....	62
Figura 6.12 – Organização funcional dos pisos -2 e -3 da Escola Secundária Rodrigues de Freitas [adaptado de 68] .....	62
Figura 6.13 – Pormenor do tecto das salas de aula e dos corredores dos pisos 1 e 0 da Escola Secundária Rodrigues de Freitas (sem escala) [65] .....	64
Figura 6.14 – Pormenor do tecto das salas de aula e dos corredores do piso -1 da Escola Secundária Rodrigues de Freitas (sem escala) [65] .....	64
Figura 6.15, 6.16 e 6.17 – Corte construtivo da biblioteca e dois pormenores da solução adoptada no tecto da biblioteca da Escola Secundária Rodrigues de Freitas (sem escala) [65] .....	65
Figura 6.18 e 6.19 – Pormenor do tecto e das paredes do novo pavilhão gimno-desportivo da Escola Secundária Rodrigues de Freitas (sem escala) [65] .....	66
Figura 7.1 – Fonte sonora e sonómetro utilizados para os ensaios de isolamento sonoro a ruídos de condução aérea na Escola Secundária Rodrigues de Freitas [fotografia da autora] .....	67
Figuras 7.2 e 7.3 – Distribuição dos pontos de emissão (E1 e E2) e de medição na sala emissora (esq.) e na sala receptora (dir.) para a determinação do isolamento sonoro a ruídos de condução aérea na Escola Secundária Rodrigues de Freitas (sem escala) .....	68
Figura 7.4 – Distribuição dos pontos de emissão (E1 e E2) e de medição no corredor e na sala de aula para a determinação do isolamento sonoro a ruídos de condução aérea na Escola Secundária Rodrigues de Freitas (sem escala) .....	68
Figura 7.5 – Máquina de impactos normalizada [fotografia da autora] .....	69
Figuras 7.6 e 7.7 – Localização das diferentes posições da máquina de percussão (esq.) e dos pontos de medição na sala receptora (dir.) para a determinação do isolamento sonoro a ruídos de percussão na Escola Secundária Rodrigues de Freitas (sem escala) .....	69
Figura 7.8 – Medição do isolamento sonoro a ruídos de condução aérea de fachadas na Escola Secundária Rodrigues de Freitas [fotografia da autora] .....	70
Figura 7.9 – Ponto de emissão (E) e pontos de medição para a determinação do isolamento sonoro a ruídos de condução aérea da fachada na Escola Secundária Rodrigues de Freitas (sem escala) .....	70
Figura 7.10 – Ponto de emissão (E) e pontos de medição para a determinação do tempo de reverberação e dos níveis de pressão sonora do ruído de fundo na Escola Secundária Rodrigues de Freitas (sem escala) .....	71
Figura 7.11 – Localização da grelha de admissão de ar na sala 0.07 na Escola Secundária Rodrigues de Freitas [fotografia da autora] .....	72
Figura 7.12 – Caixilharia interior na sala 31 da Escola Secundária Rodrigues de Freitas [53] .....	73
Figura 7.13 – Valores de $D_{nT}$ por bandas de frequência de 1/3 oitava entre salas reabilitadas da Escola Secundária Rodrigues de Freitas .....	82
Figura 7.14 – Corredor de acesso às salas de aula da Escola Secundária Rodrigues de Freitas [fotografia da autora] .....	82

Figura 7.15 – Índice de redução sonora ( $R_w$ ) de diferentes elementos de construção [5].....	83
Figura 7.16 – Valores de $L'_{nT}$ por bandas de frequência de 1/3 de oitava em duas lajes de salas reabilitadas da Escola Secundária Rodrigues de Freitas.....	83
Figura 7.17 – Valores de $D_{2m,nT}$ por banda de frequência de 1/3 de oitava na sala 0.06 reabilitada da Escola Secundária Rodrigues de Freitas .....	85
Figura 7.18 – Fachada da Escola Secundária Rodrigues de Freitas [fotografia da autora] .....	86
Figura 7.19 – Tempo de reverberação por banda de frequência na sala reabilitada -1.07 da Escola Secundária Rodrigues de Freitas .....	87
Figura 7.20 – Tempo de reverberação por banda de frequência na sala reabilitada -1.06 da Escola Secundária Rodrigues de Freitas .....	87
Figura 7.21 – Tempo de reverberação por banda de frequência na sala reabilitada 0.06 da Escola Secundária Rodrigues de Freitas .....	88
Figura 7.22 – Tempo de reverberação por banda de frequência na sala reabilitada 1.06 da Escola Secundária Rodrigues de Freitas .....	88
Figura 7.23 – Tempo de reverberação médio por banda de frequência nas salas reabilitadas da Escola Secundária Rodrigues de Freitas .....	88
Figura 7.24 – $L_A$ médios do ruído de fundo por banda de frequência com o equipamento de ventilação ligado nas salas reabilitadas da Escola Secundária Rodrigues de Freitas.....	90
Figura 7.25 – $L_A$ médios do ruído de fundo por banda de frequência com o equipamento de ventilação desligado nas salas reabilitadas da Escola Secundária Rodrigues de Freitas.....	90
Figura 7.26 – Diferença dos níveis de pressão sonora do ruído de fundo por banda de frequência nas salas reabilitadas da Escola Secundária Rodrigues de Freitas ( $\Delta L_A=L_A$ ligado - $L_A$ desligado) .....	90
Figura 7.27 – Avaliação da incomodidade do ruído dos equipamentos segundo as curvas NC nas salas reabilitadas da Escola Secundária Rodrigues de Freitas .....	93
Figura 7.28 – Avaliação da incomodidade do ruído dos equipamentos segundo as curvas NR nas salas reabilitadas da Escola Secundária Rodrigues de Freitas .....	93

## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 – Bandas de frequência de oitava de 1/3 de oitava mais utilizadas em Acústica de Edifícios .....	6
Quadro 2.2 – Valores das ponderações da curva A para as bandas de frequências de oitava na gama do audível [1].....	7
Quadro 2.3 – Classes de absorção sonora em função dos valores de $\alpha_w$ [1] .....	9
Quadro 3.1 – Variabilidade da emissão de vogais e consoantes [1].....	18
Quadro 3.2 – Parâmetros de medida da inteligibilidade da palavra [1].....	19
Quadro 3.3 – Método de cálculo do AI [1] .....	19
Quadro 3.4 – Grau de inteligibilidade em função do AI [1].....	19
Quadro 3.5 – SIL para o qual a comunicação é possível (M – masculino; F – feminino) [1] .....	20
Quadro 3.6 – Grau de inteligibilidade em função do RASTI [8].....	20
Quadro 4.1 – Diferentes fases da construção de escolas em Portugal [28] .....	32
Quadro 5.1 – Valores mínimos do índice de isolamento sonoro a ruídos de condução aérea de paredes exteriores ( $D_{2m,nT,w}$ ) em edifícios escolares segundo o RRAE [adaptado de 55] .....	41
Quadro 5.2 – Valores mínimos do índice de isolamento sonoro a ruídos de condução aérea ( $D_{nT,w}$ ) em edifícios escolares segundo o RRAE [55] .....	42
Quadro 5.3 – Valores máximos do índice de isolamento sonoro a ruídos de percussão ( $L'_{nT,w}$ ) em edifícios escolares segundo o RRAE [adaptado de 55] .....	42
Quadro 5.4 – Valores máximos do tempo de reverberação médio nas frequências de 500, 1000 e 2000 Hz em edifícios escolares segundo o RRAE [adaptado de 55].....	42
Quadro 5.5 – Valor mínimo da absorção sonora equivalente (A) em edifícios escolares segundo o RRAE [adaptado de 55] .....	43
Quadro 5.6 – Valores máximos do nível de avaliação do ruído particular dos equipamentos ( $L_{Ar,nT}$ ) em edifícios escolares segundo o RRAE [adaptado de 55] .....	43
Quadro 5.7 – Valores máximos do nível sonoro contínuo equivalente do ruído de fundo ( $L_{Aeq}$ ) em edifícios escolares segundo o BB93 [adaptado de 5].....	44
Quadro 5.8 – Valores mínimos do índice de isolamento sonoro a ruídos de condução aérea ( $D_{nT,w}$ ) em edifícios escolares segundo o BB93 [adaptado de 5].....	45
Quadro 5.9 – Valores máximos do índice de isolamento sonoro a ruídos de percussão ( $L'_{nT,w}$ ) em edifícios escolares segundo o BB93 [adaptado de 5].....	45
Quadro 5.10 – Valores máximos do tempo de reverberação médio nas frequências de 500, 1000 e 2000 Hz em edifícios escolares segundo o BB93 [adaptado de 5].....	46
Quadro 5.11 – Valores máximos do <i>Speech Transmission Index</i> (STI) em edifícios escolares segundo o BB93 [adaptado de 5].....	46
Quadro 5.12 – Valores máximos do ruído de fundo e do tempo de reverberação recomendados pela ANSI 12.60 [adaptado de 59].....	49

Quadro 5.13 – Valores mínimos do índice de redução sonora ( $R_w$ ) entre uma sala de aula e um espaço adjacente segundo a ANSI 12.60 [adaptado de 59] .....	49
Quadro 5.14 – Valores mínimos do índice de redução sonora ( $R_w$ ) entre diferentes espaços adjacentes segundo a ANSI 12.60 [adaptado de 59] .....	50
Quadro 5.15 – Valores máximos do tempo de reverberação e ruído de fundo segundo a AS/NZ 2107 [adaptado de 9] .....	51
Quadro 5.16 – Valores mínimos do índice de redução sonora ( $R_w$ ) recomendados na Nova Zelândia [adaptado de 9] .....	51
Quadro 5.17 – Comparação entre Portugal, Reino Unido, EUA e Nova Zelândia dos valores regulamentares para quatro situações .....	52
Quadro 7.1 – Índices de isolamento sonoro a ruídos de condução aérea nas antigas salas em 2008 [75].....	73
Quadro 7.2 – Índices de isolamento sonoro a ruídos de percussão nas antigas salas em 2008 [75]..	73
Quadro 7.3 – Índices de isolamento sonoro a ruídos de condução aérea da fachada da antiga sala 31 em 2008 [75].....	74
Quadro 7.4 – Tempos de reverberação médios nas frequências de 500, 1000 e 2000 Hz nas antigas salas em 2008 [75] .....	74
Quadro 7.5 – Correspondência entre a nomenclatura das salas na Escola Secundária Rodrigues de Freitas antiga (2008) e na actual reabilitada (2010).....	74
Quadro 7.6 – Níveis de pressão sonora médios nas salas reabilitadas 1.06 (compartimento emissor) e 0.06 (compartimento receptor) para determinação do isolamento sonoro a ruídos de condução aérea.....	75
Quadro 7.7 – Níveis de pressão sonora médios nas salas reabilitadas 0.06 (compartimento emissor) e -1.06 (compartimento receptor) para determinação do isolamento sonoro a ruídos de condução aérea.....	75
Quadro 7.8 – Níveis de pressão sonora médios no corredor reabilitado (compartimento emissor) e na sala reabilitada 0.06 (compartimento receptor) para a determinação do isolamento sonoro a ruídos de condução aérea .....	75
Quadro 7.9 – Índices de isolamento sonoro a ruídos de condução aérea entre salas reabilitadas .....	76
Quadro 7.10 – Níveis de pressão sonora médios na sala reabilitada 0.06 e na -1.06 para a determinação do isolamento sonoro a ruídos de percussão.....	76
Quadro 7.11 – Índices de isolamento sonoro a ruídos de percussão entre salas reabilitadas.....	77
Quadro 7.12 – Níveis de pressão sonora médios no exterior da sala reabilitada 0.06 e no interior para a determinação do isolamento sonoro a ruídos de condução aérea de fachadas .....	77
Quadro 7.13 – Índices de isolamento sonoro a ruídos de condução aérea da fachada da sala reabilitada 0.06 .....	77
Quadro 7.14 – Tempo de reverberação na sala reabilitada -1.07 da Escola Secundária Rodrigues de Freitas .....	78



Quadro 7.15 – Tempo de reverberação na sala reabilitada -1.06 da Escola Secundária Rodrigues de Freitas.....	78
Quadro 7.16 – Tempo de reverberação na sala reabilitada 0.06 da Escola Secundária Rodrigues de Freitas.....	78
Quadro 7.17 – Tempo de reverberação na sala reabilitada 1.06 da Escola Secundária Rodrigues de Freitas.....	79
Quadro 7.18 – Níveis de pressão sonora médios do ruído de fundo com o equipamento de ventilação ligado nas salas reabilitadas (2010).....	79
Quadro 7.19 – Níveis de pressão sonora do ruído de fundo médio com o equipamento de ventilação desligado nas salas reabilitadas (2010).....	79
Quadro 7.20 – Níveis sonoros médios do ruído de fundo com o equipamento de ventilação ligado nas salas reabilitadas (2010) .....	80
Quadro 7.21 – Níveis sonoros médios do ruído de fundo com o equipamento de ventilação desligado nas salas reabilitadas (2010) .....	80
Quadro 7.22 – Níveis de avaliação do ruído particular de equipamentos padronizados nas salas reabilitadas da Escola Secundária Rodrigues de Freitas .....	81
Quadro 7.23 – Comparação dos valores de $D_{n,w}$ medidos em 2008 e 2010 .....	84
Quadro 7.24 – Comparação dos valores de $L'_{n,w}$ medidos em 2008 e 2010.....	84
Quadro 7.25 – Verificação da conformidade dos valores de $D_{nT,w}$ com os limites do actual RRAE.....	85
Quadro 7.26 – Verificação de conformidade dos valores de $L'_{nT,w}$ com os limites do actual RRAE .....	85
Quadro 7.27 – Comparação dos valores de $D_{2m,n,w}$ medidos em 2008 e 2010 .....	86
Quadro 7.28 – Verificação da conformidade dos valores de $D_{2m,nT,w}$ com os limites do actual RRAE..	87
Quadro 7.29 – Comparação dos valores de TR médios obtidos em 2010 e 2008.....	89
Quadro 7.30 – Verificação da conformidade dos valores de TR com os limites do actual RRAE .....	89
Quadro 7.31 – Níveis de pressão sonora médios do ruído de fundo com e sem ventilação e a respectiva diferença nas salas da Escola Secundária Rodrigues de Freitas .....	91
Quadro 7.32 – Níveis sonoros médios do ruído de fundo com e sem ventilação e a respectiva diferença nas salas da Escola Secundária Rodrigues de Freitas.....	91
Quadro 7.33 – Verificação do limite imposto pelo actual RRAE para o valor de $L_{Ar,nT}$ nas salas reabilitadas da Escola Secundária Rodrigues de Freitas .....	92
Quadro 7.34 – Classificação NC e NR das salas reabilitadas da Escola Secundária Rodrigues de Freitas.....	92
Quadro 7.35 – Comparação dos valores dos índices de isolamento sonoro obtidos antes da reabilitação (2008) e após a reabilitação (2010) ( $\Delta = \text{índice}_{2010} - \text{índice}_{2008}$ ).....	94
Quadro 7.36 – Comparação dos valores do tempo de reverberação obtidos antes da reabilitação (2008) e após a reabilitação (2010) ( $\Delta TR = TR_{2010} - TR_{2008}$ ) e valores de $L_{Ar,nT}$ , NC e NR obtidos em cada sala após a reabilitação (2010) .....	95

Quadro 8.1 – Quadro resumo dos índices de isolamento sonoro obtidos na Escola Secundária Rodrigues de Freitas após a reabilitação .....	97
Quadro 8.2 – Tempos de reverberação das salas reabilitadas da Escola Secundária Rodrigues de Freitas .....	98
Quadro 8.3 – Quadro resumo dos resultados relacionados com o ruído de fundo e equipamentos obtidos na Escola Secundária Rodrigues de Freitas após a reabilitação .....	98

## **SÍMBOLOS E ABREVIATURAS**

A – Absorção sonora equivalente ( $m^2$ )

$A_0$  – Absorção sonora de referência ( $m^2$ )

AC – *Articulation class*

AI – *Articulation Index*

BB87 – *Building Bulletin 87*

BB93 – *Building Bulletin 93*

BEST – *Building Excellent Schools Today*

BSF – *Building Schools for the Future*

c – Celeridade (m/s)

$C_{50}$  – Claridade (dB, base 50 ms)

CR – Curva de referência

$D_{2m,n}$  – isolamento sonoro a ruídos de condução aérea de fachadas normalizado (dB)

$D_{2m,nT}$  – Isolamento sonoro a ruídos de condução aérea de fachadas padronizado (dB)

$D_{2m,nT,w}$  – Índice de isolamento sonoro a ruídos de condução aérea de fachadas padronizado (dB)

$D_{50}$  – Definição (dB, base 50 ms)

$D_n$  – Isolamento sonoro a ruídos de condução aérea normalizado (dB)

$D_{nT}$  – Isolamento sonoro a ruídos de condução aérea padronizado (dB)

$D_{nT,w}$  – Índice de isolamento sonoro a ruídos de condução aérea padronizado (dB)

DREN – Direcção Regional de Educação do Norte

EUA – Estados Unidos da América

f – Frequência (Hz)

$f_0$  – Frequência central de uma banda de frequências (Hz)

$f_1$  – Frequência limite inferior de uma banda de frequências (Hz)

$f_2$  – Frequência limite superior de uma banda de frequências (Hz)

I – Intensidade sonora ( $W/m^2$ )

$I_0$  – Intensidade sonora de referência ( $W/m^2$ )

IC – Instituto da Construção da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

IGESPAR – Instituto de Gestão do Património Arquitectónico e Arqueológico

JCETS-MOP – Ministério das Obras Públicas – Junta das Construções para o Ensino Técnico e Secundário

$L'_n$  – Falta de isolamento sonoro a ruídos de percussão normalizado (dB)

$L'_{nT}$  – Falta de isolamento sonoro a ruídos de percussão padronizado (dB)

$L'_{nT,w}$  – Índice de isolamento sonoro a ruídos de percussão padronizado (dB)

$L_{1,2m}$  – Nível médio de pressão sonora no exterior a 2 m da fachada (dB)

$L_A$  – Nível sonoro (dB)

$L_{Aeq}$  – Nível sonoro contínuo equivalente (dB)

$LA_{FEUP}$  - Laboratório de Acústica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

$LAIC$  – Laboratório de Acústica do Instituto da Construção

$L_{Ar,nT}$  – Nível de avaliação do ruído particular de equipamentos padronizado (dB)

$L_{eq}$  – Nível de pressão sonora contínuo equivalente (dB)

$L_p$  – Nível de pressão sonora (dB)

$m$  – Absorção sonora do ar em função da humidade relativa ( $m^{-1}$ )

$MRT$  – *Modified Rhyming Tests*

$NC$  – *Noise Criterion*

$NCEF$  – *National Clearinghouse for Education Facilities*

$NR$  – *Noise Rating*

$NRC$  – *Noise Reduction Coefficient*

$p$  – Pressão sonora (Pa)

$p_0$  – Pressão de referência (Pa)

$PB$  – *Phonetically Balanced words*

$PMEES$  – Programa de Modernização das Escolas Destinadas ao Ensino Secundário

$r$  – Distância (m)

$RASTI$  – *Rapid Speech Transmission Index*

$RF$  – Ruído de fundo (dB)

$RGR$  – Regulamento Geral do Ruído

$RRAE$  – Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios

$R_w$  – Índice sonoro (dB)

$S$  – Superfície real do material ( $m^2$ )

$S/N$  – *Signal to Noise Ratio* (dB)

$SAT$  – *Standard Assessment Tests*

$SFP$  – *School Facility Program*

$SIL$  – *Speech Interference Levels*

$STC$  – *Sound Transmission Class*

$STI$  – *Speech Transmission Index*

$T$  – Temperatura do meio (K)

$T_0$  – Tempo de reverberação de referência (s)

TR – Tempo de reverberação (s)

V – Volume do compartimento ( $m^3$ )

W – Potência sonora (W)

$W_0$  – Potência sonora de referência (W)

$\alpha$  – Coeficiente de absorção sonora do material

$\alpha_w$  – Coeficiente de absorção sonora ponderado

$\Delta L_A$  – Diferença entre níveis sonoros (dB)

$\lambda$  – Comprimento de onda (m)

$\rho$  – Massa volúmica do ar ( $kg/m^3$ )



# 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1. ENQUADRAMENTO E OBJECTIVOS

Nos últimos anos em Portugal tem-se vindo a verificar um crescente investimento na construção e recuperação de escolas, particularmente escolas secundárias. Muitos dos edifícios escolares existentes não cumprem os actuais requisitos presentes na legislação relativos, por exemplo, ao conforto térmico, eficiência energética e ao conforto acústico, para além de não se encontrarem totalmente adequados às actuais características de funcionamento da escola e respectivos conteúdos programáticos. Ao longo dos anos, os hábitos de vida, as relações sociais e os métodos educativos foram-se modificando o que obrigou a uma adaptação das escolas, fazendo algumas remodelações. No entanto, o natural desgaste dos materiais aliado à falta de manutenção e à sobrelotação dos espaços tornam urgente uma intervenção profunda.

A modernização das escolas secundárias portuguesas resulta de uma maior sensibilização das autoridades locais e nacionais para a referida falta de meios e da percepção que a Escola, para além de ser um local de transmissão de conhecimentos e de aprendizagem, é também um pólo de formação da sociedade que cada vez mais tem que estar virado para a comunidade. Esta vontade de reabilitar traduz também a importância que a educação ganhou um pouco por todo o Mundo.

O sucesso escolar dos alunos pode ficar seriamente comprometido devido às deficientes condições e à má acústica das salas de aula. A voz, como instrumento primordial de transmissão da mensagem, necessita de condições específicas para ser claramente compreendida, especialmente tratando-se de escolas para crianças.

A acústica de todos os espaços escolares deve ser devidamente estudada e definida para haver uma perfeita adequação do espaço às actividades que aí decorrem. O excesso de reverberação numa sala ou de ruído de fundo dificulta a comunicação entre professor e alunos, afectando todo o processo de aprendizagem.

Tratando-se de uma reabilitação o desafio é ainda maior uma vez que para resolver os problemas acústicos existentes é necessário intervir com vista ao cumprimento da legislação mas sem prejudicar o valor patrimonial do edifício. As soluções de reabilitação, para além de desempenharem a sua função, devem ser integradas no edifício sem haver a descaracterização do espaço.

Tendo por base os valores de alguns parâmetros acústicos obtidos através de medições efectuadas antes do início das obras de reabilitação, o principal objectivo deste trabalho é caracterizar e analisar as soluções de reabilitação relativas às condições acústicas através de novas medições *in situ*, comparando com os valores antigos e com os valores regulamentares.

Através do estudo do caso da modernização da Escola Secundária Rodrigues de Freitas no Porto, este documento visa ser útil para projectistas, sensibilizando para a necessidade de planear devidamente todo o processo de reabilitação acústica, principalmente os materiais a aplicar e a respectiva localização, e demonstrando que é possível respeitar os regulamentos e obter baixos custos, aplicando soluções que se encontram no mercado a preços cada vez mais acessíveis. Este trabalho também pretende indicar aos gestores de espaços idênticos os benefícios que advêm da melhoria das condições acústicas, destacando-se o incremento do desempenho quer dos alunos quer dos professores.

## **1.2. ESTRUTURA**

Este trabalho encontra-se dividido em nove capítulos: no capítulo 2 são apresentados os conceitos base da acústica; no capítulo 3 é abordado o problema da inteligibilidade da palavra nas salas de aula e os efeitos nocivos da má qualidade acústica das salas nos utilizadores; no capítulo 4 caracteriza-se o parque escolar em Portugal e o respectivo programa de reabilitação, sendo que também são analisados diferentes programas de reabilitação de escolas em prática noutros países; no capítulo 5 é referida a legislação aplicável em Portugal e noutros países; no capítulo 6 é feita uma breve descrição da escola estudada (Escola Secundária Rodrigues de Freitas) e da intervenção que foi efectuada; no capítulo 7 é descrito todo o procedimento das medições acústicas levadas a cabo na escola e são apresentados quer os resultados obtidos quer os resultados existentes, relativos a uma fase anterior à renovação, com a consequente comparação e discussão, e por fim no capítulo 8 são referidas a conclusões alcançadas e possíveis desenvolvimentos futuros.



# 2

## CONCEITOS ACÚSTICOS

### 2.1. CONCEITOS TEÓRICOS BÁSICOS

O som é o resultado da captação, pelo sistema auditivo, de alterações de pressão que se propagam no ar sob a forma de ondas esféricas centradas na fonte sonora. Como tal, o estudo de um determinado sinal sonoro pode ser feito através da análise da pressão.

O elemento mais importante a ser quantificado é a variação de pressão provocada pela propagação das ondas sonoras, tomando como referência a pressão atmosférica,  $P_{at} \approx 101400$  Pa.

A lei de propagação das ondas sonoras num meio homogéneo, isotrópico, sem viscosidade e em repouso traduz-se segundo a expressão:

$$\nabla^2 p = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (2.1)$$

em que,

p – pressão sonora (Pa);

c – celeridade (m/s).

A celeridade ou velocidade de propagação das ondas sonoras depende da temperatura do meio e calcula-se através da expressão:

$$c = 20,045\sqrt{T} \quad (2.2)$$

em que,

T – temperatura do meio (K)      $T = 273,15 + \theta$  (°C).

Representando o som por uma grandeza vectorial é possível determinar a sua componente direccional através da intensidade sonora (I). A intensidade sonora é a quantidade média de energia que atravessa por segundo uma área de  $1 \text{ m}^2$ , normal a essa direcção, que diminui com o aumento da distância à fonte sonora (expressão 2.3).

Uma característica da fonte sonora é a potência sonora (W) que se define como sendo a energia total que num segundo atravessa uma esfera fictícia centrada na fonte.

A figura 2.1 e a expressão seguinte mostram de que forma estes três parâmetros estão relacionados entre si:

$$I = \frac{W}{4\pi r^2} = \frac{p^2}{\rho \cdot c} \quad (2.3)$$

em que,

I – intensidade sonora ( $W/m^2$ );

W – potência sonora (W);

r – distância (m);

p – pressão sonora (Pa);

$\rho$  – massa volúmica (ar)  $\approx 1,2 \text{ kg/m}^3$ ;

c – celeridade (m/s).

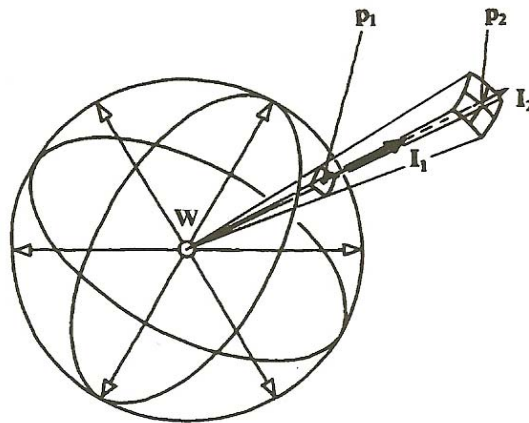


Figura 2.1 – Relação entre potência sonora, intensidade sonora e pressão sonora [1]

O ouvido humano não é sensível de modo idêntico a todas as variações de pressão sendo que a gama de audibilidade humana situa-se entre o limiar de audição,  $10^{-5}$  Pa ( $10 \mu\text{Pa}$ ), e o limiar da dor, 100 Pa ( $10^8 \mu\text{Pa}$ ) (figura 2.2). A escala utilizada para avaliar as pressões sonoras é o *decibel* (dB) uma vez que, contrariamente à escala linear em *pascal*, traduz melhor a resposta quase logarítmica do ouvido aos estímulos e conduz a números mais pequenos e mais práticos. A conversão de escalas é feita tomando como valor de referência  $2 \times 10^{-5}$  Pa e segundo as seguintes expressões análogas:

$$L_p = 20 \log\left(\frac{p}{p_0}\right) \quad L_p = 10 \log\left(\frac{p^2}{p_0^2}\right) \quad (2.4 \text{ e } 2.5)$$

em que,

$L_p$  – nível de pressão sonora (dB);

p – pressão sonora (Pa);

$p_0$  – pressão de referência,  $2 \times 10^{-5}$  Pa.

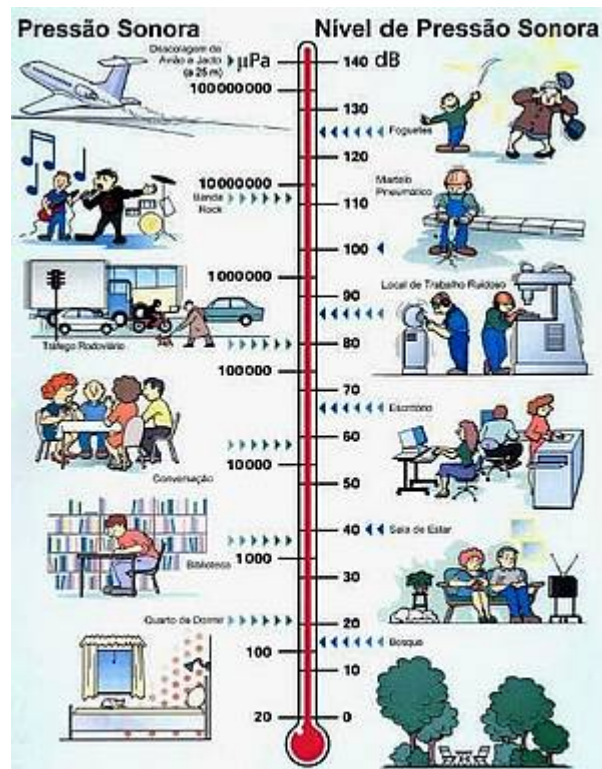


Figura 2.2 – Escala de pressão sonora ( $\mu\text{Pa}$ ) e de níveis de pressão sonora (dB) [2]

A adição de níveis de pressão sonora faz-se de forma não algébrica:

$$L_{soma} = 10 \log \left( \sum_{i=1}^N 10^{\frac{L_i}{10}} \right) \quad (2.6)$$

Tomando outros valores de referência, é possível obter os níveis de intensidade sonora ( $L_I$ ) (expressão 2.7) e de potência sonora ( $L_W$ ) (expressão 2.8) que também permitem caracterizar um dado som.

$$L_I = 10 \log \left( \frac{I}{I_0} \right) \quad (2.7)$$

$$L_W = 10 \log \left( \frac{W}{W_0} \right) \quad (2.8)$$

em que,

$I$  – intensidade sonora ( $\text{W}/\text{m}^2$ );

$I_0$  – intensidade sonora de referência,  $10^{-12} \text{ W}/\text{m}^2$ ;

$W$  – potência sonora (W);

$W_0$  – potência sonora de referência,  $10^{-12} \text{ W}$ .

Outra característica importante de um fenómeno sonoro é a frequência. A frequência ( $f$ ) representa a taxa de ocorrências das flutuações completas de pressão por segundo e exprime-se em *hertz* (Hz). A sensibilidade humana situa-se entre os 20 Hz e os 20000 Hz e vai diminuindo com a idade e dependendo da exposição a ruídos mais intensos.

Quando um som é composto por uma única frequência denomina-se som puro por oposição ao som complexo que resulta da sobreposição de vários sons puros, tendo por isso várias frequências.

Uma vez que existem inúmeras frequências e como tal de difícil análise, procede-se ao agrupamento das frequências em intervalos normalizados denominados bandas de frequências. Cada banda tem uma frequência limite superior ( $f_2$ ) e uma frequência limite inferior ( $f_1$ ) cuja diferença define a largura da banda. As larguras mais usuais em Acústica de Edifícios são as de 1/1 oitava e 1/3 de oitava. Nestes dois casos a relação entre o limite superior e o limite inferior é de 2 e  $2^{1/3}$ , respectivamente.

A designação de cada banda de frequência é dada pelo seu valor médio, frequência central ( $f_0$ ), que se obtém através da expressão 2.9.

$$f_0 = \sqrt{f_1 f_2} \quad (2.9)$$

No quadro 2.1 apresentam-se as bandas de frequência de 1/1 oitava e de 1/3 de oitava mais utilizadas em Acústica de Edifícios, podendo alargar-se essa gama quando a análise é feita em laboratório. Na figura 2.3 está representado o espectro sonoro do mesmo ruído em frequências, em bandas de frequência de 1/1 oitava e em bandas de frequência de 1/3 de oitava, podendo verificar-se que cada banda de frequência de 1/1 oitava corresponde à soma de três bandas de frequência de 1/3 de oitava.

Quadro 2.1 – Bandas de frequência de oitava de 1/3 de oitava mais utilizadas em Acústica de Edifícios

		Frequências (Hz)														
1/1 oitava		125		250		500		1k		2k						
1/3 oitava		100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k

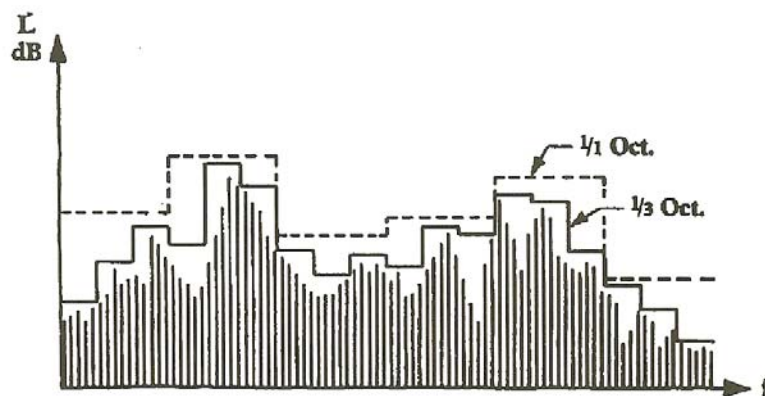


Figura 2.3 – Espectros sonoros do mesmo ruído em bandas de 1/1 oitava e de 1/3 de oitava [1]

Ao fazer a captação de sons os microfones registam fielmente as variações de pressão sonora independentemente da frequência. No entanto, o ouvido humano tem uma sensibilidade auditiva variável em frequência, dando menor ou maior importância ao som consoante a sua frequência.

De modo a traduzir esta resposta não linear do ouvido humano, são introduzidos filtros electrónicos nos aparelhos de captação de sons que corrigem os valores medidos de acordo com curvas de ponderação. Existem quatro curvas de ponderação: A, B, C e a D. A curva ou filtro A é a mais utilizada sendo que cada curva adequa-se a intensidades de ruído diferentes. O filtro A é mais indicado para sons abaixo de 55 dB, o filtro B para sons entre 55 e 85 dB, o filtro C para sons acima de 85 dB e o filtro D utiliza-se só com ruídos de aviões. No quadro 2.2 estão indicadas as ponderações da curva A para bandas de frequência de oitava.

Quadro 2.2 – Valores das ponderações da curva A para as bandas de frequências de oitava na gama do audível [1]

Frequência (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
Filtro A (dB)	-26	-15,5	-8,5	-3	0	1	1	-1	-7

Um som, para além de poder ser representado por um espectro de valores de níveis de pressão sonora e/ou por um valor global do nível de pressão sonora, também pode ser representado por um valor global do nível sonoro ( $L_A$  em dB ou  $L$  em dB(A)). Este valor obtém-se fazendo a soma logarítmica dos níveis de pressão sonora medidos, corrigidos com o filtro A.

Outro factor importante na análise de um som é a sua duração. Por vezes é complicado descrever um fenómeno sonoro apenas recorrendo ao nível de pressão sonora caso tenha uma variabilidade temporal muito grande. Desta forma utiliza-se o nível de pressão sonora contínuo equivalente ( $L_{eq}$ ) que se define como o nível de pressão sonora de um som uniforme que, no intervalo de tempo T, tem o mesmo valor eficaz da pressão sonora que o som que se pretende avaliar, cujo nível varia no tempo.

$$L_{eq} = 10 \log \frac{1}{T} \int_0^T \left( \frac{p(t)}{p_0} \right)^2 dt \quad (2.10)$$

em que,

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

p – pressão sonora uniforme (Pa);

$p_0$  – pressão de referência,  $2 \times 10^{-5}$  Pa;

T – duração do ruído (min.).

Conhecendo a duração dos regimes uniformes e o respectivo nível de pressão sonora é possível obter o  $L_{eq}$  segundo a expressão 2.11.

$$L_{eq} = 10 \log \left[ \left( \frac{1}{T} \right) \sum_{i=1}^N t_i \cdot 10^{\frac{L_i}{10}} \right] \quad (2.11)$$

em que,

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

$L_i$  – nível de pressão sonora uniforme durante o tempo  $t_i$  (dB);

$T$  – duração do ruído (min.)  $T = \sum t_i$ .

Da mesma forma que se calcula o nível sonoro também é possível obter o nível sonoro contínuo equivalente ( $L_{Aeq}$ ) fazendo a correcção dos níveis de pressão sonora com o filtro A.

## 2.2. ABSORÇÃO SONORA

Uma das formas de actuação no âmbito da Acústica de Edifícios é fazer a correcção acústica dos espaços, ou seja, tratar um dado compartimento para o som aí emitido. Este modo de procedimento tira partido de uma propriedade dos materiais designada por absorção sonora.

A absorção sonora é a capacidade que um determinado material possui de transformar a energia sonora que em si incide noutra energia. Esta propriedade depende da densidade e espessura do material assim como da frequência e do ângulo de incidência do som.

O parâmetro que permite quantificar esta propriedade é o coeficiente de absorção sonora ( $\alpha$ ). Este traduz a relação entre a energia absorvida e a energia incidente e o seu valor varia entre 0 e 1.

$$\alpha = \frac{E_{absorvida}}{E_{incidente}} \quad (2.12)$$

Existem dois métodos de determinação deste coeficiente: método do tubo de ondas estacionárias e o método da câmara reverberante. O segundo método é mais eficaz uma vez que permite vários ângulos de incidência ao contrário do tubo de ondas estacionárias. No entanto, pode conduzir a valores superiores a 1 devido à difracção do som nos bordos do material.

Um material é considerado “absorvente” quando  $\alpha$  é superior a 0,5, havendo três categorias de materiais e sistemas absorventes: porosos e fibrosos (mais eficazes nas altas frequências), ressoadores (que actuam predominantemente nas médias frequências) e as membranas (que estão associadas às baixas frequências) (figura 2.4).

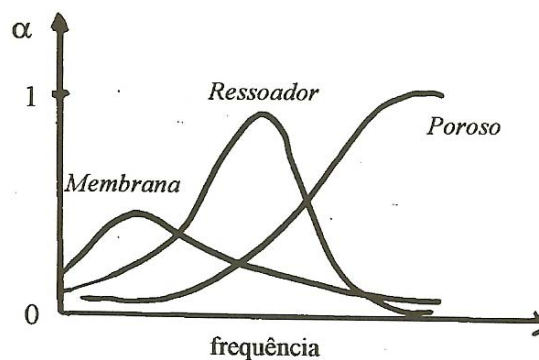


Figura 2.4 – Comportamento dos três tipos de materiais e sistemas absorventes em função da frequência [1]

Uma vez que os níveis de pressão sonora em qualquer ponto de uma sala são resultado do campo directo e do campo reverberado (figura 2.5), é necessário estudar devidamente a localização deste tipo de materiais para não tornar o som demasiado “seco” e proporcionar o adequado prolongamento das ondas sonoras. O campo reverberado tem origem nas ondas reflectidas e como tal o excesso ou a má localização de materiais absorventes pode ser prejudicial para a qualidade acústica da sala, principalmente nos locais mais afastados da fonte sonora. No entanto, existem reflexões maléficas como os ecos que devem ser evitadas. Estas reflexões atingem o receptor com uma diferença temporal superior a 50 ms em relação ao som original e dificultam a compreensão da mensagem.

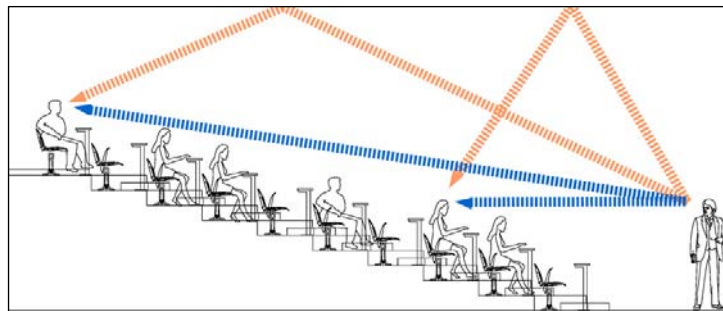


Figura 2.5 – Campo directo (azul) e campo reverberado (laranja) em diferentes pontos de uma sala [3]

Em termos práticos, um dos parâmetros utilizados para caracterizar a absorção sonora de um material é o NRC (*Noise Reduction Coefficient*). Consiste na média aritmética dos valores de  $\alpha$  nas bandas de oitava dos 250 aos 2000 Hz arredondada para o múltiplo mais próximo de 0,05.

$$NRC = \frac{\alpha_{250} + \alpha_{500} + \alpha_{1000} + \alpha_{2000}}{4} \quad (2.13)$$

Outra grandeza utilizada é o coeficiente de absorção sonora ponderado ( $\alpha_w$ ) que se obtém através do ajuste de uma curva de referência [4]. O valor de  $\alpha_w$  é o valor ajustado para a banda de frequência de 500 Hz quando soma dos desvios positivos seja inferior ou igual a 0,10. Acrescenta-se uma letra sempre que houver desvios superiores a 0,25 relativamente à curva de referência: L, M ou H consoante acontecer nos 250-500 Hz, 1000-2000 Hz e 2000-4000 Hz, respectivamente.

A norma também define diferentes classes de absorção sonora consoante o valor de  $\alpha_w$ , tal como é indicado no quadro 2.3.

Quadro 2.3 – Classes de absorção sonora em função dos valores de  $\alpha_w$  [1]

Classes de absorção sonora	$\alpha_w$
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	$\alpha_w \leq 0,10$

### 2.3. TEMPO DE REVERBERAÇÃO

Tal como foi anteriormente referido, as ondas sonoras podem ter origem directa ou reflectida sendo que, dependendo da geometria da sala e dos seus materiais constituintes, o som demora mais ou menos tempo a anular-se.

O tempo de reverberação é o tempo que um som demora a extinguir-se após a fonte sonora parar de emitir. Também pode ser definido como o tempo que o nível de pressão sonora demora a decair 60 dB. Na prática determina-se o tempo que o som demora a decair 30 dB e posteriormente obtém-se o tempo de reverberação por extrapolação.

Uma das fórmulas mais conhecidas para calcular este parâmetro é a fórmula de Sabine (expressão 2.14), cujo nome advém do seu autor Wallace Clement Sabine.

$$TR = \frac{0,16 \times V}{A} \quad (2.14)$$

em que,

TR – tempo de reverberação (s);

V – volume do compartimento (m<sup>3</sup>);

A – absorção sonora equivalente (m<sup>2</sup>)  $A = \sum_{i=1}^N \alpha_i \cdot S_i$  ;

$\alpha$  – coeficiente de absorção sonora do material;

S – superfície real do material (m<sup>2</sup>).

Tendo por base esta fórmula, outras expressões matemáticas foram sendo obtidas, como por exemplo a de Eyring, a de Millington-Sette e a de Kuttruff, cada uma adequada para diferentes situações.

A sua forma mais genérica pode ser apresentada segundo a expressão:

$$TR = \frac{0,16 \times V}{\sum_{i=1}^N \alpha_i S_i + \sum_{j=1}^M A_j + mV} \quad (2.15)$$

em que,

A<sub>j</sub> – absorções sonoras localizadas (m<sup>2</sup>);

m – absorção sonora do ar em função da humidade relativa (m<sup>-1</sup>).

O valor ideal do tempo de reverberação para uma determinada sala depende das funções ou actividades desse local (figura 2.6). No caso de salas mais direccionadas para a palavra, como as salas de aula, o tempo de reverberação tem que ser baixo sob pena de haver sobreposição das palavras, afectando assim a compreensão da mensagem transmitida. No caso de salas vocacionadas para a música, o tempo de reverberação tem ser mais elevado.



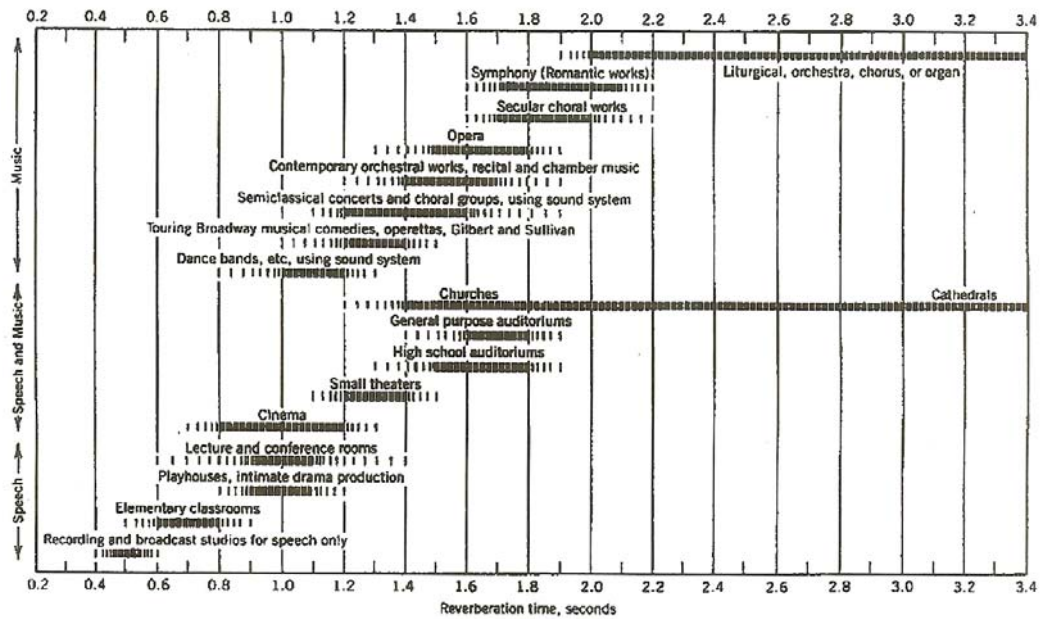


Figura 2.6 – Valores ideais do tempo de reverberação médio nas frequências de 500 e 1000 Hz em função do uso [1]

## 2.4. ISOLAMENTO SONORO

### 2.4.1. INTRODUÇÃO

A Acústica de Edifícios também tem como domínio de análise o isolamento sonoro dos locais, ou seja, tratar da envolvente de um local para os sons daí propagados ou para aí emitidos. Este conceito é amplamente utilizado, por vezes erradamente quando se fala em problemas acústicos, uma vez que o incómodo do ruído exterior afecta mais as pessoas, principalmente se o local em causa estiver perto de vias de comunicação ou ruas muito movimentadas. No entanto, quando se fala em isolamento sonoro não se refere apenas a ruído exterior mas também a ruído produzido num compartimento contíguo que se pode propagar através de portas, janelas ou paredes para outra sala.

Existem dois casos de isolamento sonoro: a ruídos de condução aérea e a ruídos de percussão. Estes dois ruídos podem ser transmitidos por via directa e/ou por via marginal (figura 2.7).

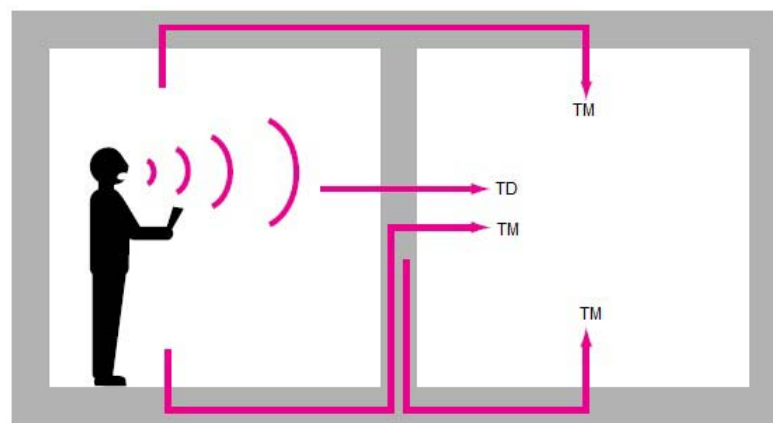


Figura 2.7 – Propagação do ruído por via directa (TD) e por via marginal (TM) [adaptado de 5]

Qualquer ponto singular da envolvente que não seja devidamente concebido e tratado é uma fragilidade que diminui o isolamento sonoro, como é o caso das caixas eléctricas, caixas de estore e o remate das portas.

#### 2.4.2. RUÍDOS DE CONDUÇÃO AÉREA

Os ruídos de condução aérea são ruídos cuja transmissão se deve apenas à vibração do ar (figura 2.8). Não existe qualquer solicitação mecânica sobre a estrutura do edifício e a propagação do som é feita através do ar e dos elementos construtivos da envolvente.

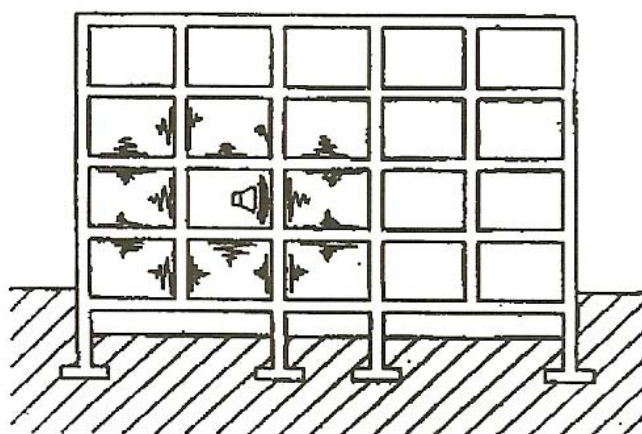


Figura 2.8 – Transmissão dos ruídos de condução aérea [1]

O isolamento sonoro a ruídos de condução aérea pode ser quantificado como sendo a diferença entre o nível de pressão sonora no emissor e o nível de pressão sonora no receptor, designando-se por isolamento sonoro bruto (D). Todavia, para efeitos regulamentares, calcula-se o isolamento sonoro padronizado ( $D_{nT}$ ) que se obtém corrigindo D para o tempo de reverberação do compartimento receptor, usando um tempo de referência  $T_0$ .

$$D_{nT} = L_1 - L_2 + 10 \log \left( \frac{T}{T_0} \right) \quad (2.16)$$

em que,

$D_{nT}$  – isolamento sonoro a ruídos de condução aérea padronizado (dB);

$L_1$  – nível médio de pressão sonora no local emissor (dB);

$L_2$  – nível médio de pressão sonora no local receptor (dB);

T – tempo de reverberação do local receptor (s);

$T_0$  – tempo de reverberação de referência, 0,5 s.

No caso de fachadas calcula-se o isolamento sonoro a ruídos de condução aérea através da seguinte expressão:

$$D_{2m,nT} = L_{1,2m} - L_2 + 10 \log\left(\frac{T}{T_0}\right) \quad (2.17)$$

em que,

$D_{2m,nT}$  – isolamento sonoro a ruído de condução aérea de paredes exteriores padronizado (dB);

$L_{1,2m}$  – nível médio de pressão sonora no exterior a 2 m da fachada (dB);

$L_2$  – nível médio de pressão sonora no local receptor (dB);

$T$  – tempo de reverberação do local receptor (s);

$T_0$  – tempo de reverberação de referência, 0,5 s.

A partir dos valores de  $D_{nT}$  e  $D_{2m,nT}$  por banda de frequência obtém-se, respectivamente, o índice de isolamento sonoro a ruídos de condução aérea ( $D_{nT,w}$ ) e o índice de isolamento a ruídos de condução aérea de fachadas ( $D_{2m,nT,w}$ ) através do ajuste dos valores reais a uma curva de referência (CR) para ruídos de condução aérea [6] (figura 2.9).

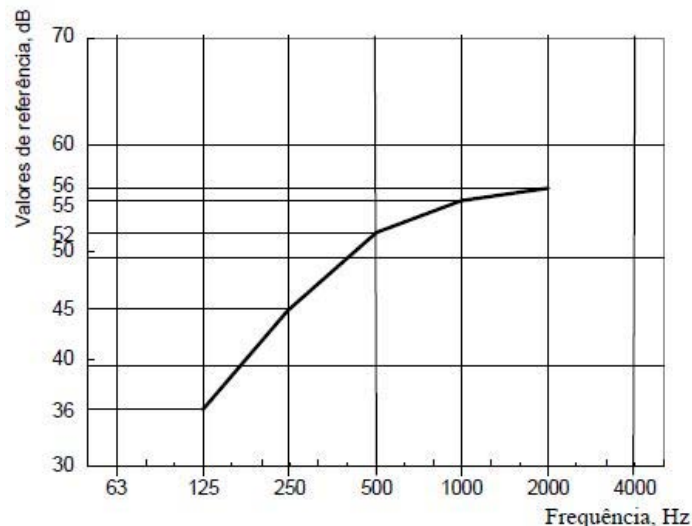


Figura 2.9 – Curva de referência para ruídos de condução aérea para o cálculo de  $R_w$ ,  $D_{nT,w}$  e  $D_{2m,nT,w}$  e para bandas de frequência de oitava [6]

Considera-se a situação ajustada quando a soma dos desvios positivos ( $CR - D_{nT}$ ) a dividir pelo número de bandas de frequência utilizadas for o maior possível mas sem ultrapassar 2,0. O valor do índice corresponde ao valor da curva ajustada para a banda de frequência de 500 Hz.

Caso as medições sejam feitas em laboratório, ou seja, sem a contabilização das transmissões marginais, calcula-se a redução sonora ( $R$ ) do elemento separador (expressão 2.18), parâmetro que caracteriza o isolamento sonoro a ruídos de condução aérea de um elemento. Com os valores de  $R$  por banda de frequência obtém-se o índice de redução sonora ( $R_w$ ), ou STC, *Sound Transmission Class*, na nomenclatura anglo-saxónica, com recurso à curva de referência para ruídos de condução aérea acima mencionada.

$$R = L_1 - L_2 - 10 \log \left( \frac{A}{S} \right) \quad (2.18)$$

em que,

R – redução sonora (dB);

$L_1$  – nível médio de pressão sonora no local emissor (dB);

$L_2$  – nível médio de pressão sonora no local receptor (dB);

A – absorção sonora do compartimento receptor ( $m^2$ );

S – superfície real do elemento separador ( $m^2$ ).

As duas formas de actuação para aumentar o isolamento sonoro aos ruídos de condução aérea são proceder ao aumento da massa do elemento separador ou à sua duplicação física (figura 2.10). Dentro dos diferentes materiais de construção o vidro é o que tem uma menor redução sonora, justificando-se assim uma maior preocupação com a concepção e execução das janelas de um edifício.

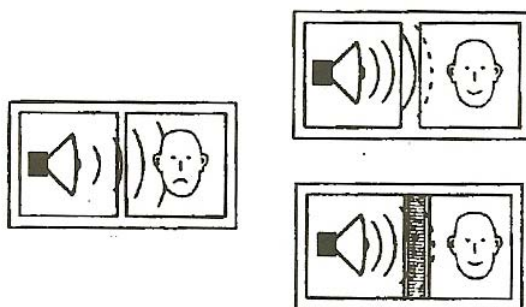


Figura 2.10 – Soluções de tratamento do isolamento sonoro a ruídos de condução aérea: aumento da massa do elemento separador e duplicação de paramentos [1]

#### 2.4.3. RUÍDOS DE PERCUSSÃO

Os ruídos de percussão têm origem na solicitação mecânica directa da fonte sonora sobre os elementos construtivos. A sua capacidade de propagação é maior uma vez que os elementos se encontram rigidamente ligados. (figura 2.11).

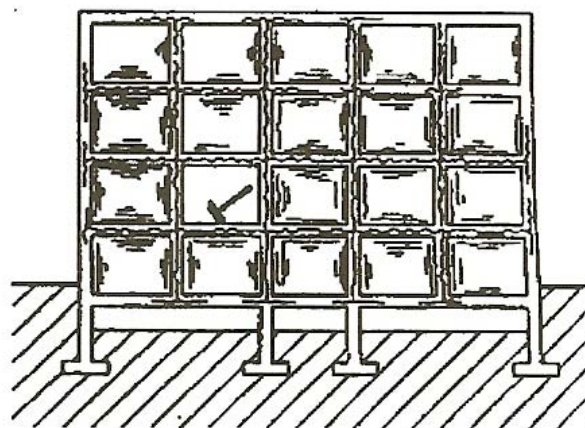


Figura 2.11 – Transmissão dos ruídos de percussão [1]

A medição do isolamento sonoro a ruídos de percussão é feita recorrendo a uma máquina de impactos normalizada (figura 7.5) e avalia-se o ruído no piso inferior. Tal como nos ruídos de condução aérea, também se calcula o isolamento sonoro padronizado ( $L'_{nT}$ ) e, por ajuste a uma curva de referência para ruídos de percussão definida na norma NP EN ISO 717-2 [7] (figura 2.12), o índice de isolamento sonoro a ruídos de percussão ( $L'_{nT,w}$ ).

$$L'_{nT} = L_i - 10 \log \left( \frac{T}{T_0} \right) \quad (2.19)$$

em que,

$L'_{nT}$  – isolamento sonoro a ruídos de percussão padronizado (dB);

$L_i$  – nível médio de pressão sonora no local receptor (dB);

$T$  – tempo de reverberação do local receptor (s);

$T_0$  – tempo de reverberação de referência, 0,5 s.

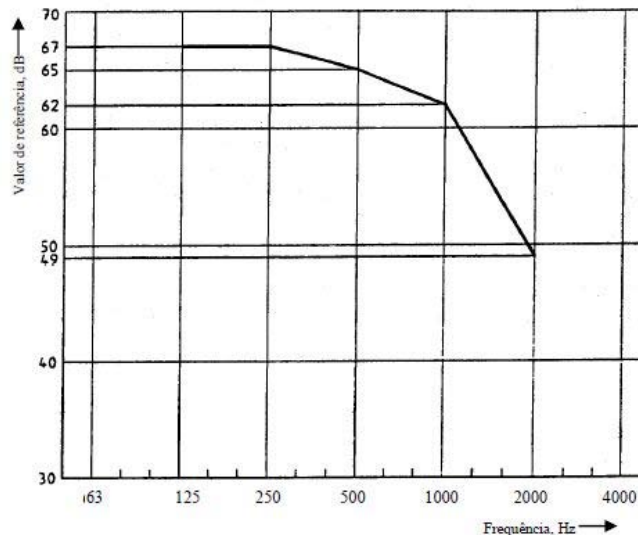


Figura 2.12 – Curva de referência para ruídos de percussão para o cálculo de  $L'_{nT,w}$  e para bandas de frequência de oitava [7]

Neste caso o ajuste termina quando a soma dos afastamentos ( $L'_{nT}-CR$ ) a dividir pelo número de bandas de frequência utilizadas for o maior possível mas sem ultrapassar os 2,0. O valor de  $L'_{nT,w}$  corresponde ao valor da curva ajustada para a banda de frequência de 500 Hz, deduzindo 5 dB caso sejam usadas bandas de oitava.

Para minimizar as perturbações provocadas por este tipo de ruído pode-se actuar ao nível da fonte sonora, afastando-a dos locais onde são desejados os baixos níveis sonoros, reduzindo a velocidade das massas de impacto ou aplicando camadas de material resiliente nas superfícies sujeitas a impacto, ao nível do caminho de transmissão, isolando a fonte de vibração por descontinuidades estruturais, e ao nível do receptor, cobrindo as superfícies radiantes com tecto suspenso ou aplicando-lhes capas amortecedoras.

Na figura 2.13 são apresentadas três formas de actuação em lajes: revestimento do piso por um material resiliente como a alcatifa, colocação de um tecto falso no piso inferior suspenso com suspensores anti-vibráticos ou execução de uma laje flutuante. Este tipo de laje caracteriza-se por ter uma camada de material resiliente (fibras minerais, aglomerados de cortiça) que dessolidariza os elementos construtivos impedindo assim a propagação do ruído.

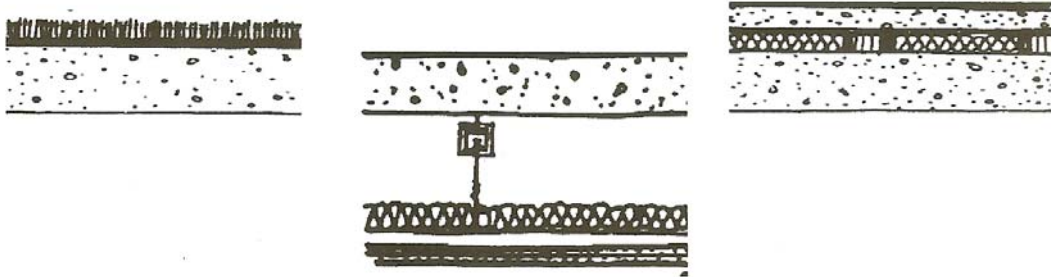


Figura 2.13 – Diferentes formas de incremento do isolamento sonoro a ruídos de percussão: revestimento do piso com alcatifa, tecto falso na zona inferior da laje e laje flutuante [1]

# 3

## INTELIGIBILIDADE DA PALAVRA

### 3.1. INTRODUÇÃO

A transmissão da mensagem entre o orador e o receptor é muitas vezes comprometida devido quer às más condições acústicas do local quer ao ambiente circundante, exigindo assim um maior esforço por parte do orador e do receptor para a comunicação ser bem sucedida.

No caso das escolas este problema assume uma importância fulcral uma vez que, tratando-se de estabelecimentos de ensino, é fundamental garantir que todos os intervenientes na sala de aula conseguem ser ouvidos e compreendidos, ou seja, é necessário assegurar que as salas possuem as condições ideais para aprendizagem.

A inteligibilidade da palavra é uma característica acústica de um local que traduz o grau de compreensão das palavras. Uma vez que as escolas são locais em que a transmissão de conhecimentos é basicamente feita através da palavra, torna-se imprescindível haver uma boa inteligibilidade.

Para garantir uma boa inteligibilidade é necessário ter em atenção o carácter variável da emissão da voz humana, realçando que esta não se propaga de uma forma uniforme como uma fonte omnidireccional. Para além da direccionalidade existe uma variação ao nível da frequência, da intensidade e da duração.

A propagação da voz humana é preferencialmente para a frente do emissor havendo algumas frequências (baixas) que também se propagam eficazmente para a parte de trás do orador, tal como evidenciado na figura 3.1.

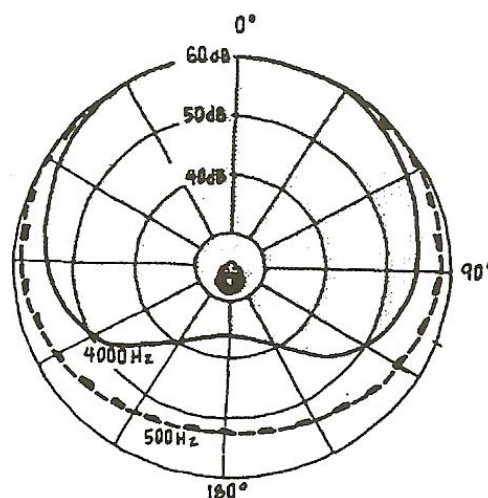


Figura 3.1 – Propagação da voz humana por frequências [1]

O orador não emite no espaço com o mesmo nível de pressão sonora as altas e as baixas frequências uma vez que a face funciona como uma barreira que reflecte os baixos comprimentos de onda ( $\lambda$ ) a que correspondem a altas frequências.

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (3.1)$$

em que,

$\lambda$  – comprimento de onda (m);

c – celeridade (m/s);

f – frequência (Hz).

Os sons emitidos no dia-a-dia pelas pessoas abrangem uma gama muito alargada de frequências e com diferenças em relação ao nível de pressão sonora. As vogais estão associadas às baixas frequências e são sons de maior intensidade contrastando com as consoantes que estão associadas às altas frequências sendo sons de menor intensidade.

Em termos de duração, as vogais prolongam-se mais do que as consoantes daí ser imperativo que o tempo de reverberação do local seja alvo de uma particular atenção para não haver sobreposição de sílabas e conseqüente perda de inteligibilidade. Existem pequenas palavras no vocabulário que apenas se distinguem pela sua consoante, logo um tempo de reverberação adequado torna-se um auxílio na melhoria da compreensão da mensagem emitida.

No quadro 3.1 é apresentada uma síntese dos factores que contribuem para a variação da emissão da voz.

Quadro 3.1 – Variabilidade da emissão de vogais e consoantes [1]

Tipo	Frequência	Intensidade	Duração	Direccionalidade
vogais	baixas	elevado	≈ 90 ms	-5 dB p/180°
consoantes	altas	baixo	≈ 20 ms	-20 dB p/180°

Para se alcançar uma boa inteligibilidade o ruído de fundo não pode ser muito elevado sob pena de ser superior ao emitido. As boas reflexões também devem ser potenciadas para ser menor o esforço do orador para ser ouvido em locais mais distantes. É considerado o limite de perceptibilidade da palavra a duração de 50 ms, isto é, todos os sons reflectidos que atinjam o receptor até 50 ms após a chegada do som directo são assimilados como sendo som directo. As restantes reflexões apenas contribuem para a perda de inteligibilidade da palavra.

### 3.2. PARÂMETROS DE MEDIDA DA INTELIGIBILIDADE DA PALAVRA

Para avaliar a inteligibilidade da palavra existem os parâmetros subjectivos e os objectivos (quadro 3.2). Os métodos subjectivos consistem na leitura de palavras ou frases que são registadas por auditores que se encontram na sala. O grau de inteligibilidade é atribuído comparando as palavras ditadas com as registadas. Nos métodos objectivos é necessário proceder à medição de parâmetros acústicos de forma calcular os diferentes índices.



Quadro 3.2 – Parâmetros de medida da inteligibilidade da palavra [1]

Subjectivos	PB ( <i>Phonetically Balanced words</i> )
	MRT ( <i>Modified Rhyming Tests</i> )
Objectivos	AI ( <i>Articulation Index</i> )
	SIL ( <i>Speech Interference Levels</i> )
	AC ( <i>Articulation Class</i> )
	STI e RASTI ( <i>Rapid Speech Transmission Index</i> )

O índice de articulação (AI) é proporcional ao grau de inteligibilidade. Obtém-se através da diferença entre o nível de conversação de referência (nc) e o ruído de fundo (rf), multiplicada pelo peso relativo de cada banda de frequências (p) sendo posteriormente feito o somatório e dividido por 10000. O quadro 3.3 indica o método descrito e o quadro 3.4 apresenta a relação entre o índice de articulação e o grau de inteligibilidade.

O *Articulation Class* (AC) tem um método de cálculo semelhante mas a análise é feita com as bandas de frequência de 1/3 de oitava dos 200 Hz até aos 5000 Hz e com 15 pesos.

Quadro 3.3 – Método de cálculo do AI [1]

Frequência (Hz)	Nível de conversação (nc)	Peso (p)	Ruído de fundo (rf) (dB)	nc-rf máx 30	(nc-rf) × p
250	72	18			
500	73	50			
1000	78	75			
2000	63	107			
4000	58	83			
				Σ=	
					AI=Σ/10000

Quadro 3.4 – Grau de inteligibilidade em função do AI [1]

AI	Grau de inteligibilidade
< 0,05	nula
[0,05 – 0,20[	fraca
[0,20 – 0,30[	boa
≥ 0,30	muito boa

O nível de interferência na conversação (SIL) calcula-se através da média aritmética dos níveis de pressão sonora do ruído de fundo (RF) nas bandas de frequência dos 500, 1000 e 2000 Hz:

$$SIL = \frac{RF_{500Hz} + RF_{1000Hz} + RF_{2000Hz}}{3} \quad (3.2)$$

No quadro 3.5 apresentam-se os valores de SIL em função da distância e do género do orador para os quais a comunicação da palavra é, no limite, possível.

Quadro 3.5 – SIL para o qual a comunicação é possível (M – masculino; F – feminino) [1]

Distância (m)	SIL (dB)							
	Esforço de voz							
	Normal		Elevado		Muito alto		Gritando	
	M	F	M	F	M	F	M	F
0,3	68	63	74	69	80	75	86	81
1,0	58	53	64	59	70	65	76	71
2,0	52	47	58	53	64	59	70	65
3,0	48	43	54	49	60	55	66	61
4,0	46	41	52	47	58	53	64	59

O método objectivo mais utilizado para avaliar a inteligibilidade da palavra é o *Rapid Speech Transmission Index* (RASTI). Este índice é obtido com recurso a uma fonte sonora que emite um sinal e um receptor que analisa a distorção desse mesmo som e varia entre 0, que corresponde a uma inteligibilidade nula, e 1, que corresponde a uma inteligibilidade óptima (quadro 3.6).

Quadro 3.6 – Grau de inteligibilidade em função do RASTI [8]

RASTI	Grau de inteligibilidade
[0 – 0,30[	má
[0,30 – 0,45[	mediocre
[0,45 – 0,60[	suficiente
[0,60 – 0,75[	boa
[0,75 – 1,00]	excelente

O RASTI é um método simplificado de calcular o *Speech Transmission Index* (STI) uma vez que apenas analisa as bandas de frequência de oitava de 500 Hz e 2000 Hz por oposição ao STI que envolve todas as bandas de frequências de oitava dos 125 Hz aos 8000 Hz.

As condições acústicas de uma sala também podem ser avaliadas através de relações energéticas. A Claridade ( $C_{50}$ ) é dada pela razão entre a energia recebida nos primeiros 50 ms e a energia recebida posteriormente, conforme a expressão 3.3.

$$C_{50} = 10 \log \frac{\int_0^{50} p^2(t) dt}{\int_{50}^{\infty} p^2(t) dt} \quad (3.3)$$

A Definição ( $D_{50}$ ) é a razão entre a energia recebida nos primeiros 50 ms e a energia total recebida, conforme a expressão 3.4.

$$D_{50} = \frac{\int_0^{50} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} \quad (3.4)$$

Acompanhando o referido no início do capítulo, ambas as relações energéticas têm como referência o limite de perceptibilidade da palavra, 50 ms.

### 3.3. FONTES DE RUÍDO

Analisando as diferentes fontes de ruído que podem perturbar o bom funcionamento de uma escola é possível agrupá-las em três grupos:

- Ruído interno;
- Ruído externo;
- Ruído de equipamentos.

Na figura 3.2 estão representadas algumas das diferentes fontes de ruído existentes numa escola, tais como corredores ruidosos, ruído do tráfego aéreo, ruído proveniente do recreio, ruído dos aparelhos de ventilação e climatização, ruídos provocados pela queda de chuva na cobertura e ruídos das salas de aula contíguas.

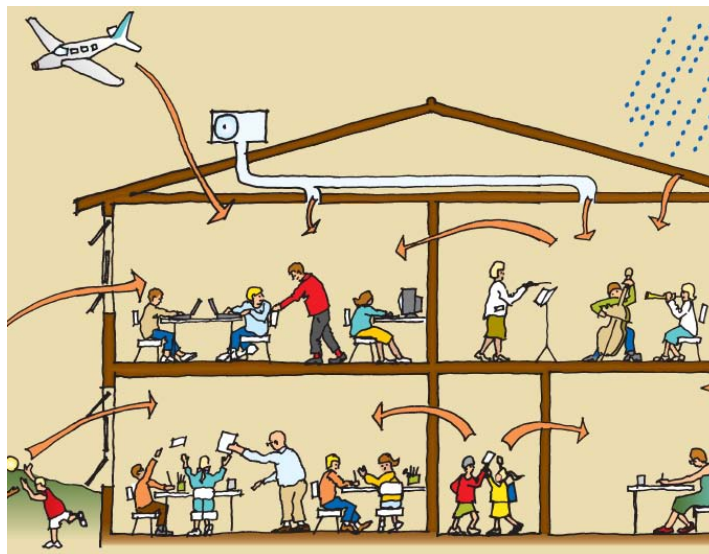


Figura 3.2 – Diferentes fontes de ruído interno, externo e de equipamentos que afectam as escolas [9]

Entende-se por fontes de ruído interno todas aquelas cujo ruído produzido resulte da actividade normal do edifício, como por exemplo conversas nas salas adjacentes, passagem de pessoas no corredor ou movimentação de mobiliário ou pessoas nas salas vizinhas (figura 3.3). A propagação deste tipo de ruído está intrinsecamente ligada às soluções construtivas de paredes, tectos e pisos existentes no edifício. Num edifício rehabilitado, tal como o estudado no âmbito deste trabalho, é fundamental conhecer o tipo de construção presente para definir os pontos mais fracos em termos de facilidade de transmissão do ruído e pensar cuidadosamente nas soluções adoptar com vista à colmatação de falhas no isolamento sonoro.

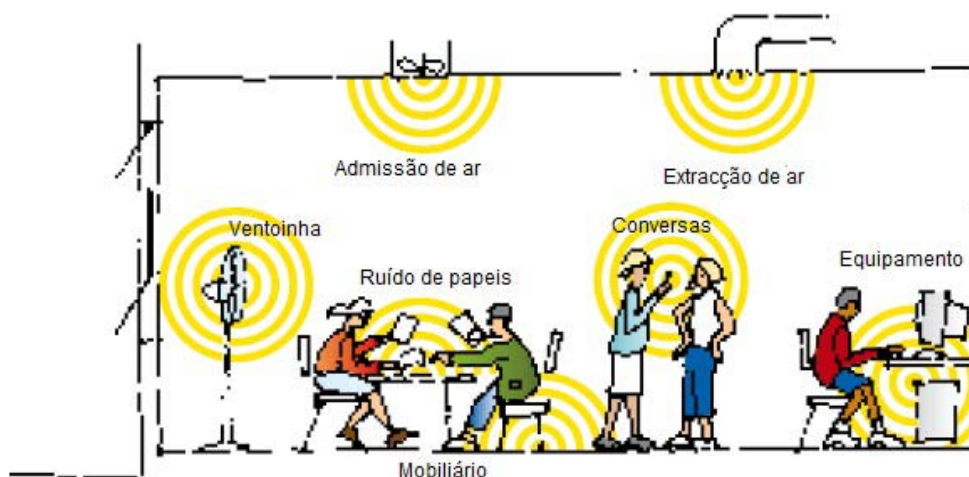


Figura 3.3 – Fontes de ruído interno e de equipamentos [adaptado de 9]

Hoje em dia para respeitar as normas de ventilação e qualidade do ar torna-se indispensável a instalação de grelhas de ventilação, reguláveis ou fixas, directamente nas janelas ou nas fachadas. Estes pontos de entrada de ar se não forem correctamente isolados contribuem para deterioração da qualidade acústica da sala e para um aumento do ruído de fundo proveniente do exterior. A solução de intervenção nestes casos nunca poderá passar pelo fecho definitivo das grelhas sob a pena de prejudicar o conforto ambiental da sala.

As principais fontes de ruído externo são o tráfego rodoviário, ferroviário e aéreo e as indústrias situadas perto dos edifícios (figura 3.4). No entanto, todas as actividades escolares levadas a cabo dentro da envolvente da escola, como por exemplo trabalhos de manutenção dos jardins, actividades desportivas, brincadeiras das crianças, são também consideradas fontes de ruído externo. Existem em muitas escolas, incluindo a escola em estudo, salas situadas nos pisos mais inferiores que estão directamente voltadas para o parque de estacionamento dos docentes. O constante movimento de carros é uma fonte de ruído que perturba e desconcentra os alunos, dificultando o normal funcionamento da aula.

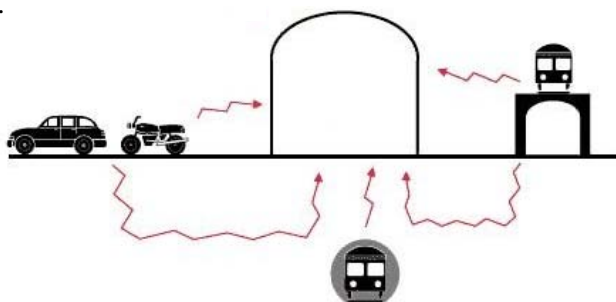


Figura 3.4 – Ruído do tráfego rodoviário e ferroviário [adaptado de 10]

Numa escola são vários os equipamentos que estão em funcionamento durante o período de aulas. As novas metodologias de ensino utilizam cada vez mais diferentes aparelhos, como retroprojectores, computadores e quadros interactivos, para tornar as aulas mais dinâmicas e prender a atenção dos alunos.

Para além destes equipamentos, os sistemas de ventilação e climatização (figura 3.5) também são responsáveis pelo aumento do nível sonoro no interior da sala de aula. A vibração induzida por estes equipamentos pode originar um nível sonoro mais elevado principalmente se a ligação aos elementos construtivos for muito rígida, isto porque a energia propaga-se mais rapidamente.



Figura 3.5 – Sistema de ventilação numa sala da Escola Secundária Rodrigues de Freitas [fotografia da autora]

Para avaliar o incómodo causado pelo ruído de fundo provocado por equipamentos utilizam-se as curvas de incomodidade *Noise Criterion* (NC) e *Noise Rating* (NR).

As curvas NC são um conjunto de curvas com diferentes níveis de pressão sonora nas bandas de frequência de oitava entre 63 Hz e 8000 Hz. O método de avaliação consiste em sobrepor o espectro do ruído de fundo e verificar qual é a curva que não é excedida por nenhum nível de pressão sonora. A classificação NC final é o valor da menor curva excedida.

As curvas NR são semelhantes às curvas NC com a diferença de utilizar as bandas de frequência de oitava de 32 Hz a 8000 Hz. Tal como as curvas NC, a classificação NR corresponde à menor curva excedida.

No caso de haver um valor limite para a classificação NC ou NR para um dado local em função do uso a que se destina, as curvas de incomodidade apresentam a grande vantagem de permitirem verificar quais são as bandas de frequências que excedem a curva desejada, facilitando assim todo o processo de intervenção para a correcção dessa falha.

As figuras 3.6 e 3.7 apresentam as diferentes curvas NC e NR, respectivamente.

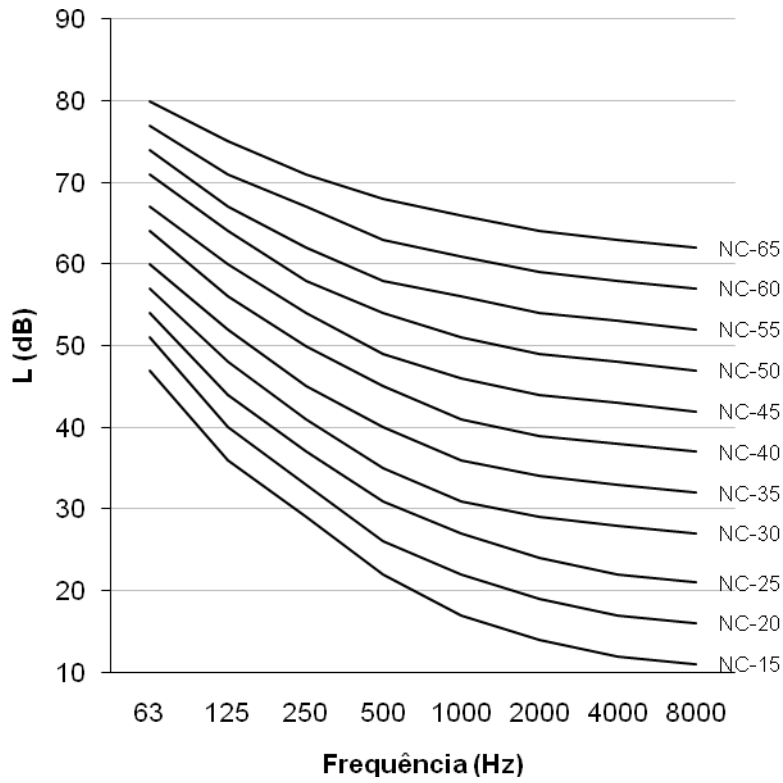


Figura 3.6 – Curvas NC [11]

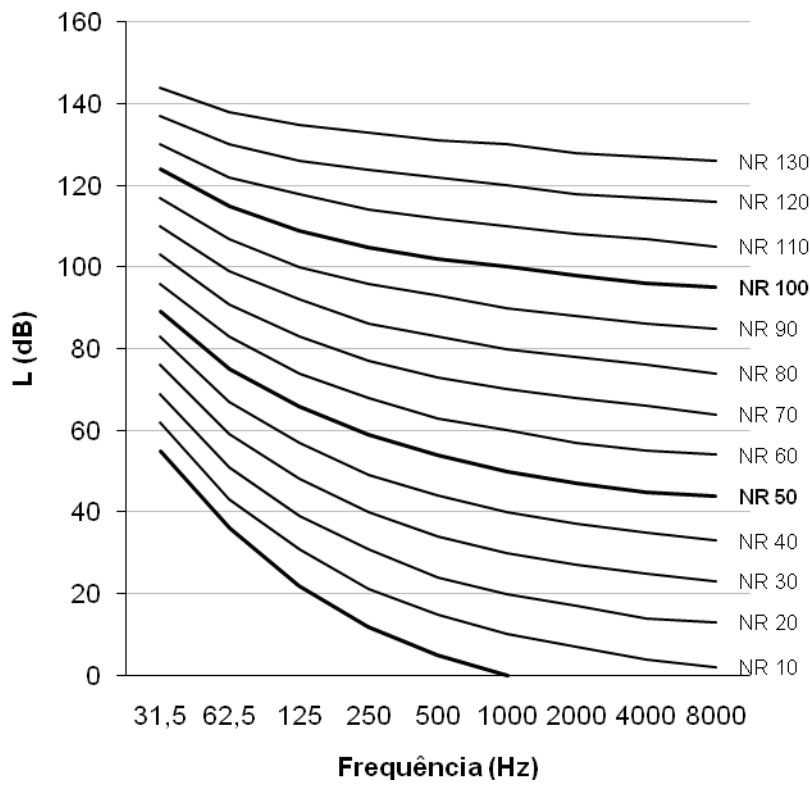


Figura 3.7 – Curvas NR [12]

### 3.4. EFEITOS DA ACÚSTICA NAS SALAS

Em Portugal, reflectindo um pouco o que se passa noutros países da Europa [13], o problema da qualidade acústica dos espaços escolares era pouco valorizado. No planeamento de uma nova escola ou de pequenos trabalhos de manutenção a sensibilidade das autoridades era maior para as questões da mobilidade das pessoas, da qualidade do ar interior, do conforto térmico e da iluminação dos espaços, eventualmente por haver uma maior divulgação dos impactos negativos na saúde dos alunos, docentes e funcionários das escolas.

No caso da acústica, os impactos também são significativos mas a grande maioria das salas de aula não tem qualquer tratamento acústico. Salas com demasiadas superfícies reflectoras dando origem a tempos de reverberação elevados, falta de isolamento sonoro entre salas vizinhas e o excesso de ruído proveniente do exterior são algumas das patologias que afectam o desempenho dos alunos e professores e podem comprometer todo o processo de aprendizagem. Devido à generalizada falta de aplicação dos conhecimentos adquiridos na área da acústica, Knut Marczinske [13] concluiu, em 2001, que na Europa a acústica das salas de aula tinha sido um passatempo académico no passado. Desde os finais da década de 1930, início de 1940, que existem publicações sobre a acústica de salas e a sua importância para uma boa inteligibilidade da palavra [13] mas a concepção e construção de algumas escolas ainda era feita sem a intervenção de especialistas em acústica. Esta situação tem vindo a mudar nos últimos anos muito devido à crescente sensibilização para a importância da acústica no ensino, o que tem levado à formulação ou revisão das normas e regulamentos acústicos.

A fraca qualidade acústica das salas de aula traduz-se muitas vezes em dificuldades de concentração, problemas cognitivos e de memorização e falta de motivação dos alunos [14, 15]. Ambientes com um elevado ruído de fundo tornam-se muito stressantes e cansativos para os alunos, levando à distração e consequente falta de aproveitamento.

Para avaliar o impacto do ruído externo e do ruído interno nas crianças, Shield e Dockrell [16] compararam os níveis de ruído em escolas de três bairros de Londres com os resultados nos testes de avaliação padronizados (SAT – *Standard Assessment Tests*) de matemática, ciências e inglês, de crianças entre os 7 e os 11 anos.

O ruído externo e o ruído interno têm um impacto negativo nos resultados dos testes mas afectam as crianças de formas distintas. Os alunos mais velhos são mais afectados pelo ruído externo, talvez devido ao facto de estarem expostos durante um período maior de tempo ao ruído ou devido à maior exigência das actividades que desenvolvem na escola. Dentro do ruído externo, os ruídos pontuais, como a passagem de motas ou camiões, afectam mais os alunos mais velhos, ao contrário das crianças mais novas que são afectadas pelo ruído de fundo geral constante. O ruído provocado pela actividade da sala prejudica o desempenho nas actividades verbais e não verbais, com particular incidência nas actividades de leitura.

Sutherland e Dubman apresentam diversos estudos [17] onde são demonstrados os efeitos nocivos do ruído exterior no desenvolvimento das crianças. Num desses estudos é feita a comparação entre salas de aula sujeitas ao ruído ferroviário e salas mais silenciosas, verificando-se diferenças no desenvolvimento da capacidade de leitura de 3 - 4 meses em crianças de 8 anos e de 11 meses em crianças de 12 anos.

Noutro estudo apresentado pelos mesmos autores, levado a cabo em 14 escolas nos EUA situadas a diferentes distâncias de uma auto-estrada, também se demonstra influência negativa do ruído rodoviário na capacidade de leitura das crianças em diferentes anos escolares. Com o aumento do

ruído de fundo nas salas de aula provocado pelo tráfego rodoviário, os resultados dos testes de leitura diminuem, sendo maior esse decréscimo nos alunos mais velhos (figura 3.8).

Em ambos os estudos as duas razões mais plausíveis apontadas para as diferenças entre grupos etários são o facto de se ter observado que, com os mais novos, os professores optaram por um ensino mais individualizado ou a hipótese de um agravamento da redução da aprendizagem nas crianças das salas ruidosas à medida que avançam de ano [17].

### Impacto do ruído rodoviário no desempenho escolar

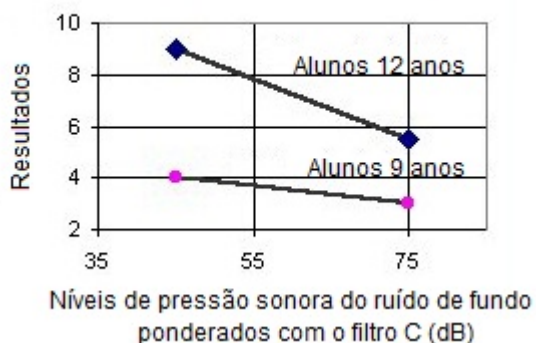


Figura 3.8 – Evolução dos resultados dos testes de leitura levados a cabo em 14 escolas dos EUA com crianças de 9 e 12 anos em função do nível de pressão sonora do ruído de fundo ponderado com o filtro C [adaptado de 17]

No estudo desenvolvido por Stelmachowicz *et al.* [18] recorreram-se a diferentes testes de reconhecimento de palavras para avaliar o efeito do ruído de fundo na compreensão destas por parte das crianças. De um modo geral o que se verifica é que as crianças não obtêm resultados satisfatórios quando a inteligibilidade da palavra é baixa (figura 3.9). Diminuindo o ruído, a capacidade de compreensão da mensagem aumenta, sendo que quanto mais novas as crianças, menor a percentagem de respostas correctas em qualquer tipo de ambiente.

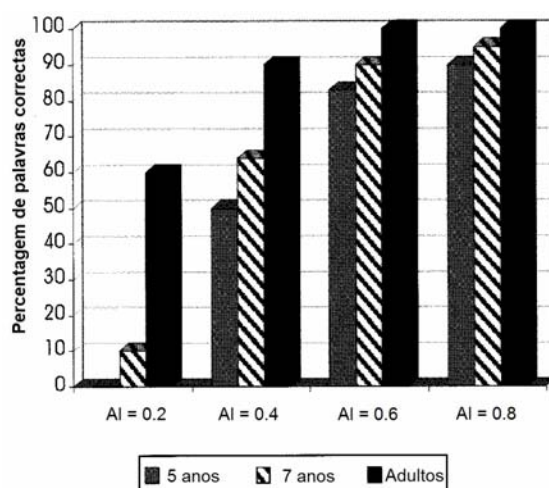


Figura 3.9 – Percentagem de respostas correctas a testes de reconhecimento de palavras de crianças de 5 anos, 7 anos e adultos em quatro ambientes de audibilidade diferentes (AI = 0,2, baixa audibilidade até AI = 0,8, elevada audibilidade) [adaptado de 18]



Durante o ano lectivo as crianças são confrontadas com novos conteúdos e novos conceitos que, por serem pouco familiares, são mais difíceis de assimilar, daí ser fundamental haver uma comunicação clara e eficiente entre professores e alunos. As crianças, como ainda estão a desenvolver a sua linguagem, perante uma falha na transmissão da mensagem não são capazes de colmatar essa falha por terem falta de vocabulário. Apenas nos últimos anos da adolescência é que são capazes de captar uma conversa em ambientes ruidosos, tal como os adultos. Werner e Boike [18] demonstraram que as crianças mais novas não apresentam um foco de atenção nas frequências que diferenciam a mensagem transmitida do ruído de fundo.

Quando se tratam de salas de aula com alunos não nativos, ou seja, a sua língua materna não é a utilizada no dia-a-dia, a situação é ainda mais grave. O elevado ruído de fundo é ainda mais prejudicial para estas crianças uma vez que, não sendo a sua primeira língua, a falta de vocabulário é ainda maior, necessitando por isso de ainda menos ruído de fundo para compreender as indicações do professor.

Ambientes silenciosos são essenciais para a concentração dos alunos e para haver a devida transmissão e compreensão da palavra. Os alunos facilmente se distraem e se sentem desmotivados quando não percebem os professores, sendo, desta forma, recomendado que o ruído de fundo não exceda os 35 dB(A) para se atingir uma boa inteligibilidade da palavra em salas de aula [19].

O tempo de reverberação das salas de aula também pode ter um efeito negativo em todo o processo de aprendizagem, caso seja muito alto. Tal como foi referido no capítulo 2, o som recebido pelo ouvinte é consequência do campo directo e do campo reverberado. Salas com elevada reverberação potenciam a sobreposição das ondas reflectidas às ondas directas, dificultando a devida compreensão da mensagem.

Um estudo levado a cabo na Alemanha [20] analisou o efeito do tempo de reverberação na capacidade de percepção das palavras das crianças através de testes de reconhecimento de palavras e frases realizados nas salas de aula de cada turma (mais reverberantes) e em salas de aula modificadas, com tempo de reverberação de 0,5 s. Os resultados obtidos nas salas mais reverberantes foram piores do que nas salas com menor reverberação, verificando-se também que quanto maior a diferença entre o tempo de reverberação das salas, maior a melhoria do desempenho dos alunos (figura 3.10). Nas salas da escola 8 o tempo de reverberação era superior a 1 s enquanto que nas salas da escola 1 a reverberação não era muito superior a 0,5 s.

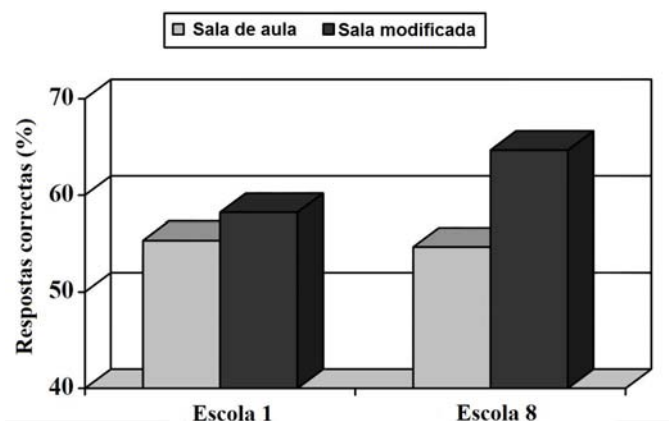


Figura 3.10 – Comparação dos resultados dos testes de compreensão de palavras e frases efectuados em salas com tempos de reverberação distintos, em duas escolas na Alemanha [adaptado de 20]

Salas de aula com elevada reverberação exigem um maior esforço por parte dos alunos para ouvirem a mensagem em detrimento do esforço para assimilar a informação transmitida. Todo o processo de captação, processamento e memorização da mensagem é feito com mais dificuldade [14].

A reabilitação acústica das salas, com implementação de materiais absorventes, afirma-se como importante para o desenvolvimento das crianças uma vez que, controlando o tempo de reverberação, obtêm-se ambientes mais silenciosos que se coadunam melhor com ensino e com a aprendizagem, não esquecendo porém a necessidade das reflexões das ondas sonoras. Demonstra-se, desta forma, que é fundamental controlar o valor do tempo de reverberação das salas de aula, devendo o seu valor estar situado entre os 0,6 e os 0,8 s [21, 22].

O comportamento das crianças na sala de aula também é afectado pelas más condições acústicas da sala de aula, na medida em que o aumento do ruído no interior da sala induz comportamentos mais “barulhentos” nas crianças devido à distração.

Em relação aos professores, as fracas condições acústicas das salas de aula podem originar problemas vocais devido à constante elevação da voz para serem perfeitamente compreendidos pelos alunos. No estudo de Heloisa Machado *et al.* [23] é demonstrado como os professores tendem a adaptar o nível da sua voz conforme o ruído existente na sala. Para serem claramente ouvidos por todos os alunos, os professores falam tanto mais alto quanto o ruído de fundo, tentando que a diferença entre a sua voz e o ruído seja a maior possível.

Em salas de aula com elevado ruído de fundo muitas vezes a compreensão da palavra não é comprometida devido ao esforço vocal feito pelos professores. No estudo realizado por Astolfi *et al.* [24] com base num questionário destinado a avaliar o conforto acústico das salas de aula feito aos alunos e professores de 4 escolas em Turim, Itália, verifica-se que, apesar dos elevados níveis de ruído de fundo medidos nas salas, os alunos classificam (numa escala de 0 a 5) o incómodo do ruído de fundo como baixo e a inteligibilidade da palavra como elevada (figura 3.11). Na única sala de aula em que o professor utilizou um tom de voz normal (G\_1A), o incómodo do ruído de fundo aumentou e a compreensão da palavra obteve uma classificação mais baixa.

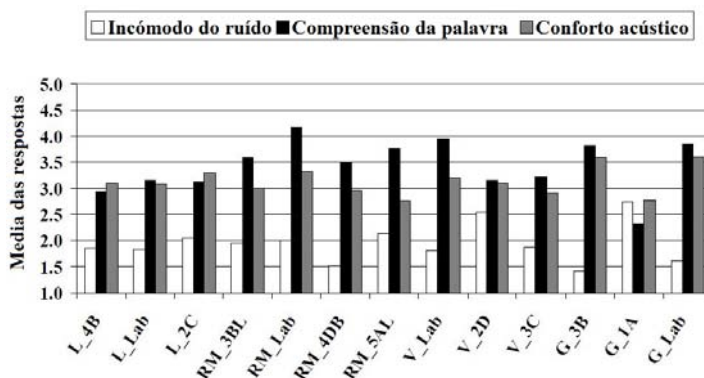


Figura 3.11 – Média da classificação subjectiva do incómodo do ruído, da compreensão da palavra e do conforto acústico em 13 salas de aula em Itália [adaptado de 24]

As principais queixas dos professores prendem-se com o esforço necessário durante a emissão, a dificuldade em manter a voz, a sensação de cansaço ao falar, variações na frequência habitual, a rouquidão, a falta de volume e projecção, a perda de eficiência vocal e a pouca resistência para falar [23]. Estes problemas poderão ser responsáveis por um maior absentismo dos professores e por uma elevada desmotivação dos professores.

Todos os recursos utilizados para acentuar ideias e chamar a atenção como a respiração, as pausas, a entoação e o ritmo, são elementos importantes para uma boa comunicação e dicção e impedem que o discurso se torne monótono. Ao falar mais alto, a qualidade das frases diminui uma vez que estas tornam-se mais curtas, mais simples, o discurso torna-se mais prolongado e com menos ênfases e modulações [23], havendo assim uma maior dificuldade em cativar e motivar os alunos.

Através de testes de reconhecimento de palavras, Bradley e Sato [25] verificaram que, em média, as crianças mais novas (6 anos) necessitam de ambientes 7 dB mais silenciosos que os alunos mais velhos (11 anos) para obter um resultado de 95 % de respostas correctas (figura 3.12).

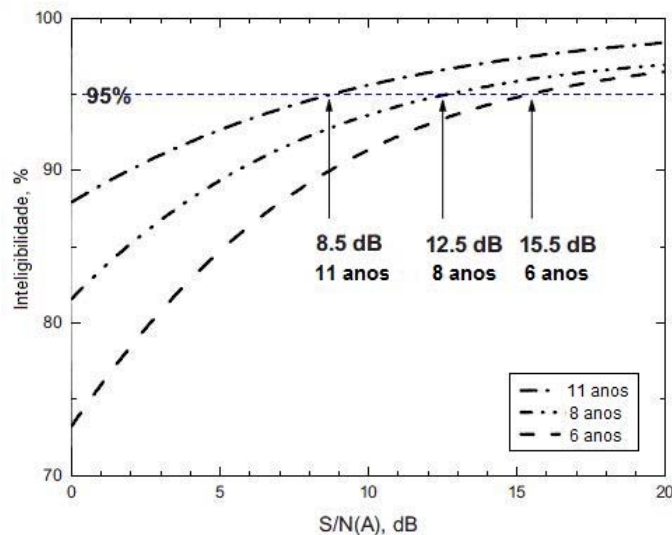


Figura 3.12 – Tendência média dos resultados dos testes de reconhecimento de palavras efectuados por crianças de 6, 8 e 11 anos em função da relação sinal/ruído e a respectiva intersecção com a linha de 95 % de respostas correctas [adaptado de 25]

Neste estudo, os autores também apuraram que, de modo a que 80 % dos alunos atinjam os 95 % de respostas correctas, a relação sinal/ruído ( $S/N$  – *Signal to Noise Ratio*), ou seja, a diferença entre a voz do orador e o ruído de fundo, tem que ser superior a 20 dB, 18 dB e 15 dB para os alunos de 6 anos, 8 anos e 11 anos, respectivamente. Em ambientes ruidosos, estas diferenças entre grupos etários exigem uma adaptação constante do esforço vocal dos professores para haver uma perfeita distinção da mensagem por parte dos alunos.

Para que todos os alunos entendam correctamente a mensagem emitida pelo professor, o valor mínimo recomendado para a relação sinal/ruído é 15 dB [18, 19], havendo a necessidade de ter valores mais elevados quanto mais novas forem as crianças e no caso de crianças com problemas auditivos ou crianças não nativas.



# 4

## REABILITAÇÃO DE ESCOLAS

### 4.1. CARACTERIZAÇÃO DO PARQUE ESCOLAR EM PORTUGAL

Em Portugal a construção de escolas destinadas ao ensino secundário público iniciou-se no final do século XIX com a criação do primeiro liceu nacional em Lisboa, o Liceu Passos Manuel, recentemente reabilitado [26] (figura 4.1).



Figura 4.1 – Liceu Passos Manuel em Lisboa [27]

Actualmente existem 502 escolas secundárias [28] com diferentes morfologias, estilos arquitectónicos distintos e inúmeras soluções construtivas. Esta heterogeneidade presente no parque escolar português é fruto das diferentes ideias que foram prevalecendo nos diferentes períodos de construção de escolas em Portugal, dando origem a um conjunto que engloba edifícios que vão desde os de elevado valor patrimonial até soluções que vieram a ser reproduzidas um pouco por todo o país.

Ao longo dos anos, os programas funcionais das escolas foram-se alterando assim como os processos construtivos e a arquitectura dos espaços. Deste modo é possível agrupar as escolas em três fases distintas (quadro 4.1).

Quadro 4.1 – Diferentes fases da construção de escolas em Portugal [28]

Fase	Anos
1	até 1939
2	de 1940 a 1968
3	a partir de 1968

a) Fase 1 – Até 1939

Nesta primeira fase estão incluídos os primeiros liceus planeados de raiz em Portugal, como por exemplo o edifício estudado no âmbito deste trabalho, a Escola Secundária Rodrigues de Freitas (antigo liceu D. Manuel II) situado na Praceta Pedro Nunes, na freguesia de Cedofeita no Porto (figura 4.2). Estes edifícios são considerados referências da arquitectura portuguesa do início do século XX pelo retrato fiel que apresentam das expressões arquitectónicas da época, sendo todos património edificado de grande simbolismo.

A sua implantação evoluiu de um edifício compacto com um único pátio para um edifício semelhante ao modelo francês de *Lycée*, formando um quarteirão urbano com um ou mais pátios [28]. Com influências que vão desde a *art déco* até à linguagem modernista, as escolas caracterizam-se pelos grandes volumes de superfícies lisas e coberturas planas com grandes janelas elaboradas [21]. Em termos de soluções construtivas, são edifícios bastantes robustos, de construção tradicional com alguns elementos inovadores à época, como estruturas metálicas, evoluindo posteriormente para sistemas de construção mistos [28].

Na sua organização funcional o maior destaque é dado aos serviços administrativos e à biblioteca, local que acumulava a função de *sala de actos*, atribuindo-lhes uma zona central da escola. Os restantes espaços lectivos, como salas de aula, laboratórios e espaços relacionados com a prática desportiva, encontram-se distribuídos ao longo de alas que se desenvolvem desde o corpo central, estando os laboratórios situados nas zonas mais periféricas por razões de segurança [28].



Figura 4.2 – Escola Secundária Rodrigues de Freitas no Porto [fotografia da autora]

b) Fase 2 – De 1940 a 1968

Sob a responsabilidade do Ministério das Obras Públicas – Junta das Construções para o Ensino Técnico e Secundário (JCETS-MOP) foram construídas escolas que se caracterizam pela uniformidade formal uma vez que foram adoptados programas de arquitectura normalizados referentes a escolas de ensino liceal ou ensino técnico (industrial, comercial ou agrícola) [29].

São construções lineares com configurações em U, H, L ou E que ocupam um quarteirão urbano, constituídas por vários corpos unidos entre si, geralmente de dois ou mais pisos. No caso das escolas técnicas industriais, há ainda um corpo adicional destinado a acolher as oficinas. Em termos arquitectónicos, verifica-se uma maior sobriedade, sem grandes decorações. Um regresso à tradição nacional com coberturas inclinadas e cantarias decorativas. As soluções construtivas encontradas são tecnologias mistas com paredes resistentes em alvenaria de pedra e lajes de piso em betão. A estrutura da cobertura em telhado é em madeira excepto a cobertura das oficinas que tradicionalmente é inclinada em forma de *shed* revestida com chapas onduladas de fibrocimento.

Os liceus possuem como elemento central um corpo principal onde se situam os serviços administrativos, com acesso directo pelo exterior e autónomos das restantes zonas, a biblioteca e espaço para os professores. O espaço para as salas de aula encontra-se organizado por ciclos em alas, continuando a preocupação em situar os laboratórios nas extremidades. Nesta época os ginásios desportivos também funcionavam como sala de convívio, havendo por isso uma caixa de palco. A organização funcional das escolas técnicas é semelhante à dos liceus. O corpo central, que se desenvolve em altura chegando a ter quatro pisos, engloba as salas de aula e serviços administrativos. O edifício das oficinas é isolado dos outros corpos da escola e de piso único.

A figura 4.3 apresenta um exemplo de uma escola técnica industrial e comercial, a Escola Secundária Carlos Amarante em Braga.



Figura 4.3 – Escola Secundária Carlos Amarante em Braga [30]

c) Fase 3 – Desde 1968

Com o objectivo tornar a construção das escolas mais rápida e mais económica, no final da década de 1960 foram elaborados projectos-tipo para liceus, escolas técnicas e escolas preparatórias [29]. Os projectos caracterizam-se por um conjunto de pavilhões interligados por galerias exteriores cobertas, cujo traçado é adaptado à morfologia do terreno. Mais tarde, nos anos 1980, é desenvolvido um novo projecto-tipo, que mantém a estrutura anterior, designado “3x3”.

São construções modulares com estrutura porticada e lajes de betão armado e paredes de alvenaria de tijolo rebocadas e pintadas. As coberturas são planas, não visitáveis ou com cobertura inclinada revestidas com placas de fibrocimento.

Em termos funcionais, os liceus integram quatro tipos de blocos: um bloco de piso único onde se situam os serviços administrativos, o refeitório, a biblioteca, a sala dos docentes e a sala de convívio, dois tipos de blocos destinados a aulas, ambos com dois pisos, um para laboratórios e o outro para as aulas normais, e um bloco reservado à prática desportiva e respectivos espaços de apoio.

No projecto das escolas técnicas também existem quatro tipos de blocos: um bloco de dois pisos destinado à direcção, secretaria, biblioteca e sala polivalente, na qual se inclui um palco e refeitório, um bloco de aulas com dois ou três pisos de planta quadrangular, o bloco de oficinas muito semelhante ao do modelo anterior e um pavilhão desportivo.

As escolas preparatórias incluem dois tipos de blocos: um bloco de piso e meio para todos os serviços de apoio aos professores e alunos e outro de piso único para salas de aula. O projecto que surgiu nos anos 1980, “3x3”, caracteriza-se por dois tipos de blocos: um bloco de planta quadrangular com dois pisos para actividades lectivas e administrativas e outro bloco de planta rectangular onde se localiza o refeitório e a sala dos alunos.

Como exemplo de uma escola pavilhonar “3x3” apresenta-se a Escola Secundária de Inês de Castro em Vila Nova de Gaia (figura 4.4).



Figura 4.4 – Escola Secundária de Inês de Castro em Vila Nova de Gaia [31]



## 4.2. PROGRAMA DE MODERNIZAÇÃO DAS ESCOLAS

### 4.2.1. PORTUGAL

No ano de 2007 o governo Português lançou um programa de reabilitação de escolas secundárias, Programa de Modernização das Escolas Destinadas ao Ensino Secundário (PMEES), com o objectivo de intervir em 332 escolas até 2015 [32], requalificando as infra-estruturas escolares. Este programa encontra-se dividido até ao momento em quatro fases: fase piloto, já completa, que abrangeu 4 escolas, uma das quais a Escola Secundária Rodrigues de Freitas, fase 1 e fase 2 com 26 e 75 escolas em construção, respectivamente, e fase 3 que engloba 100 escolas cuja concepção se encontra em curso [24] (figura 4.5).

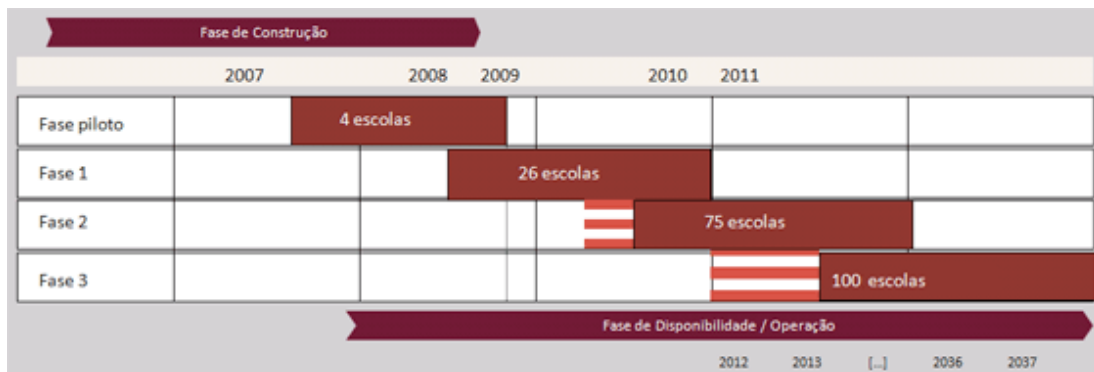


Figura 4.5 – Plano de implementação do Programa de Modernização das Escolas Destinadas ao Ensino Secundário [32]

Muitas das escolas nacionais debatem-se com graves problemas de deterioração física dos seus equipamentos e de obsolescência funcional, resultantes do desgaste dos materiais e da sobre-ocupação, e problemas de incumprimento dos parâmetros de eficiência energética, de conforto térmico, acústico e da qualidade do ar, juntando ao facto de não se encontrarem preparadas para o futuro, não conseguindo oferecer condições para acolher as actividades previstas nos programas escolares.

Os três principais objectivos do programa de modernização são recuperar e modernizar os edifícios, abrir as escolas à comunidade e criar um sistema eficiente e eficaz de gestão dos edifícios [33]. A reabilitação das escolas implica a correcção dos problemas construtivos existentes, visa tornar os edifícios mais eficientes do ponto de vista energético e dotar a escola de condições de habitabilidade e conforto, dando particular atenção às questões da higrotérmica, acústica, qualidade do ar, segurança e acessibilidade. Todas as intervenções nas escolas prevêm, para além da reabilitação estrutural e funcional, a reabilitação acústica dos espaços escolares, sendo definido, conjuntamente com os projectos das outras especialidades, o projecto de condicionamento acústico de todos os espaços escolares de modo a ser possível cumprir os requisitos regulamentares.

Tendo em conta a variabilidade dos currículos escolares e a própria evolução dos princípios de ensino, os novos espaços criados, para além de se tornarem espaços mais agradáveis, passam a ser espaços mais flexíveis e multifuncionais, garantindo-se assim uma solução a longo prazo.

Este programa é considerado não só um investimento na educação mas também uma forma de intervir no meio urbano onde se encontra inserida a escola, sendo por isso criadas condições para a abertura de alguns espaços escolares para actividades culturais e desportivas fora do horário normal do funcionamento escolar.

Todo o processo de intervenção nas escolas conta, desde o início até à conclusão da obra, com a participação activa de toda a comunidade escolar. Este envolvimento precoce dos utentes vem reforçar a ideia da escola como local onde se aprende a viver em comunidade. O projecto adoptado para cada escola não se trata de um projecto-tipo mas sim um modelo que se coaduna com o respectivo projecto educativo, capaz de responder de uma forma positiva às necessidades, objectivos e características de cada comunidade. Todo o processo inicia-se com a apresentação do Plano Estratégico de cada escola onde são identificadas as grandes necessidades.

O Programa de Modernização das Escolas Secundárias pretende reorganizar o espaço escolar definindo diferentes sectores funcionais devidamente articulados [28] (figura 4.6):

1. Núcleo de aprendizagem formal

Constituído por salas de aula preparadas para diferentes métodos de ensino (expositivos ou com recurso a material informático) e por equipamentos de ensino mais específico, como laboratórios, salas de informática e salas para grupos.

2. Núcleo de biblioteca/centro de recursos

Situado no centro simbólico da escola, dispõe de áreas destinadas à consulta de material e exposição dos espólios escolares.

3. Núcleo de espaços desportivos

Espaços preparados para a prática desportiva que incluem ginásio, pavilhão, campos descobertos e cobertos e respectivas zonas de balneários. Tal como a biblioteca, estes espaços são acessíveis a toda comunidade urbana envolvente.

4. Núcleo de espaços sociais e de convívio

Este núcleo é o que tem uma maior utilização por parte da globalidade da comunidade escolar uma vez que engloba a sala polivalente, o núcleo de alunos e o bar/cantina. São espaços que visam encorajar a socialização, incentivar a permanência na escola e criar um espírito de comunidade.

5. Núcleo de recepção, gestão/administração e atendimento geral

Locais que pela sua maior exposição pública funcionam muito como espelho da escola, havendo o cuidado de criar espaços que fomentem o bem-estar e funcionais que permitam o melhor atendimento dos utilizadores.

6. Núcleo de direcção

Pela sua importância, os gabinetes e salas de reunião que constituem este núcleo estão situados numa zona central permitindo o fácil acesso a várias áreas da escola.

7. Núcleo de docentes

O trabalho dos docentes é mais extenso do que transmitir conhecimentos aos alunos. Deste modo os professores têm que ter locais onde possam preparar as aulas, atender encarregados de educação e participar em acções de formação.

8. Núcleo de funcionários

As escolas também têm previsto no projecto zonas de descanso e vestiários para os funcionários.

## 9. Núcleo de formação de adultos e certificação de competências

Outra aposta que tem vindo a ser feita em Portugal é a formação dos adultos, dando a oportunidade de terminar os seus estudos a quem não o fez no passado. As escolas, como pólos de educação, passam a ter incluído na sua organização funcional, áreas autónomas preparadas para esse fim.

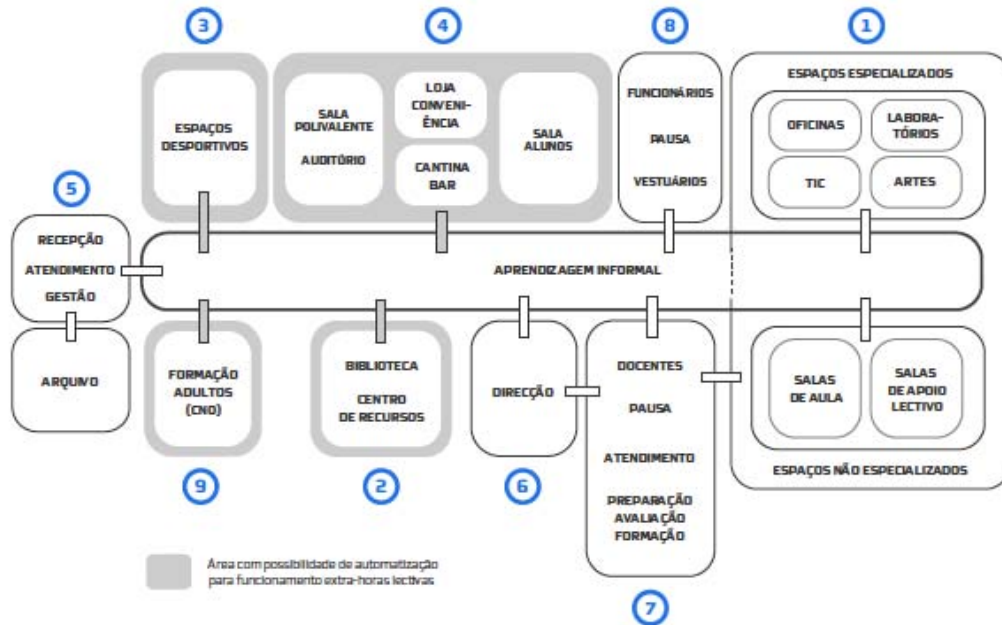


Figura 4.6 – Organização e articulação dos sectores funcionais da escola de acordo com o Programa de Modernização das Escolas Destinadas ao Ensino Secundário [28]

O planeamento, gestão, desenvolvimento e execução do Programa de Modernização das Escolas Secundárias é da responsabilidade da *Parque Escolar, EPE*, uma entidade pública empresarial criada em 2007 pelo Governo e tutelada pelos ministérios das Finanças e da Educação. Esta empresa visa promover a elaboração dos projectos e da construção, bem como assegurar a fiscalização, acompanhamento e assistência técnica nas diversas fases do programa de modernização, manter actualizado o registo e diagnóstico do estado de conservação das escolas e promover a comunicação e o apoio à comunidade escolar [34].

### 4.2.2. OUTROS PAÍSES

O investimento na modernização de escolas não se resume apenas a Portugal. Existem muitos países que têm em marcha os seus programas de reabilitação ou construção de novas escolas com a finalidade de fornecer melhores condições de ensino e preparar as escolas para as novas tecnologias, estando muitas vezes inseridos em planos de dinamização das respectivas economias nacionais.

Em Inglaterra e lançado em 2004 pelo *Department for Education and Skills*, o programa de reabilitação de escolas secundárias, *Building Schools for the Future (BSF)*, visa dotar as escolas de condições físicas e técnicas por forma a estimular alunos e professores [35]. Para implementar e gerir este programa, foi criada a *Partnerships for schools* que também é responsável pelo *Primary Capital Programme* de reabilitação de escolas primárias [36].

Neste plano de renovação há várias preocupações com a sustentabilidade dos edifícios, a criação de espaços funcionais e flexíveis e a inclusão das novas tecnologias para os novos métodos de ensino, havendo também um apelo à comunidade local para se envolver na concepção da nova escola [35].

A acústica dos espaços de ensino também é alvo de intervenção tendo sido recentemente incluída como um dos pontos mínimos que os projectos devem obedecer para serem aprovados [37]. Neste programa foi definido um patamar mínimo que os projectos devem respeitar para terem uma boa classificação e serem aprovados, de modo a garantir que todos os esforços são feitos para construir escolas com excelentes condições [38].

Este programa encontra-se dividido até ao momento em seis fases [39]. Iniciou-se com a escolha das localidades piloto (figura 4.7) e de seguida evoluiu para mais grupos de cidades cujas escolas já foram, estão a ser ou serão, alvo de intervenção [40]. Em termos de perspectivas futuras, este programa define como metas até 2011 todas as localidades já terem recebido os fundos necessários para pelo menos ser possível a renovação da escola com mais carências e até 2016 todas as cidades terem obras em curso [41].



Figura 4.7 – Escola rehabilitada em Bradford, Inglaterra [42]

Nos Estados Unidos da América (EUA) encontra-se em vigor um grande plano de estímulo da economia com os objectivos, entre outros, de criar emprego e modernizar as infra-estruturas nacionais, o *American Recovery and Reinvestment Act of 2009* [43]. No âmbito deste plano são disponibilizados fundos para a reabilitação e modernização das escolas públicas que são aplicados nos diferentes programas federais de apoio às escolas [43] e nos programas que cada estado tem, de um modo individual e muitos desde os anos 1990, de renovação do parque escolar [44]. As principais orientações sobre o planeamento, a concepção, a construção, as melhorias e manutenção das escolas são dadas pelo *National Clearinghouse for Education Facilities* (NCEF) criado em 1997 pelo *U.S. Department of Education* [45]. Relativamente à acústica das escolas, o NCEF fornece uma grande informação sobre normas, livros e artigos em publicações da especialidade, importantes para auxiliar os projectistas.

Como exemplo de alguns programas levados a cabo por estados dos EUA apresenta-se o caso da Califórnia e do Colorado com o *School Facility Program* (SFP) e o *Building Excellent Schools Today* (BEST), respectivamente. O SFP da Califórnia, sobre a alçada do *Office of Public School Construction*, foi criado em 1998 e concede financiamento aos agrupamentos escolares para a modernização ou construção de novas escolas [46]. Para aceder ao auxílio estatal cada agrupamento tem que, numa primeira fase, se submeter a um pedido de elegibilidade e posteriormente a um pedido de financiamento [47]. O programa do estado do Colorado, o BEST, aprovado em 2008, também é um programa de financiamento dos agrupamentos escolares para a renovação ou construção de novas escolas. Neste programa é dada prioridade a projectos relacionados com questões de saúde e segurança, projectos para aliviar a sobrelotação e projectos de inclusão das novas tecnologias.

Países como a Austrália e a Escócia também têm em vigor diferentes planos de modernização do respectivo parque escolar, demonstrando-se assim o crescente interesse dos diferentes governos na Educação e nos espaços escolares como formas de progressão do país. O programa australiano, *Building the Education Revolution* (BER) [48], insere-se no plano de estímulo da economia australiana e divide-se em três vertentes: modernização das escolas primárias (*Primary Schools for the 21st Century*) reabilitação ou construção de laboratórios e centros de línguas nas escolas secundárias (*Science and Language Centres for 21st Secondary Schools*) e construção de pequenas infra-estruturas nas escolas (*National School Pride*).

As obras realizadas ao abrigo deste programa vão desde a construção de bibliotecas, renovação salas de aula e ginásios, reparação de telhados e instalações hidráulicas, substituição dos quadros por quadros interactivos, pintura integral das escolas, reabilitação de cozinhas e cantinas, instalação de painéis solares, reabilitação do espaço exterior, tratamento acústico das salas de música e de teatro e melhoria das acessibilidades [49, 50]. A acústica dos novos centros de línguas não foi esquecida, estando definido numa publicação do governo australiano [51] que estes espaços, para além de terem que ser flexíveis, permitindo o trabalho em grupo ou individual, deverão ter um projecto acústico para redução do ruído e isolamento sonoro.

A renovação de escolas na Escócia também conta com a contribuição da comunidade escolar na concepção da escola, identificando os seus desejos e interesses, de forma conceber um edifício mais personalizado e tendo em conta os seus utilizadores. Os grandes objectivos do programa são a criação de edifícios sustentáveis e energeticamente eficientes, acessíveis a todos, incluindo a comunidade urbana onde cada escola se insere, e dotados com as novas tecnologias de ensino [52]. Todo o processo é levado a cabo com uma perspectiva de futuro, considerando sempre os factores da durabilidade das soluções, da deterioração, da obsolescência e da manutenção dos espaços. As intervenções nas escolas passam pela melhoria do conforto térmico, da qualidade acústica, da qualidade do ar interior e da iluminação dos espaços, respeitando sempre as respectivas orientações e normas aplicáveis [53].



# 5

## LEGISLAÇÃO

### 5.1. PORTUGAL

Em Portugal a legislação relacionada com a acústica tem vindo a evoluir ao longo dos anos procurando-se cada vez mais uniformizar os conceitos e os requisitos por toda a Europa, colocando a qualidade acústica dos edifícios como uma prioridade para o conforto dos utilizadores.

Na década de 1980 começaram a surgir em Portugal as primeiras leis, decretos-lei e portarias nesta área, destacando-se o decreto-lei 251/87 que aprovava o *Regulamento Geral sobre o Ruído*. Este documento foi revogado em 2000 dando lugar ao *Regime Legal sobre a Poluição Sonora* que, em 2007, foi substituído pelo *Regulamento Geral do Ruído* (RGR) aprovado pelo decreto-lei 09/07 [54]. O *Regulamento Geral do Ruído* aplica-se às actividades permanentes e temporárias e outras fontes de ruído passíveis de causar incómodo, fixando valores limites para o ruído produzido e respectivas sanções no caso de incumprimento. Também define algumas das competências do Estado e outras entidades públicas em matéria de ruído.

Relativamente à Acústica de Edifícios, foi instituído o *Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios* (RRAE) inicialmente pelo decreto-lei 129/2002 e depois pelo decreto-lei 96/2008 [55]. Este regulamento aplica-se a diferentes tipos de edifícios, entre eles as escolas (artigo 7º), definindo os parâmetros de desempenho acústico dos edifícios e os indicadores do ruído de equipamentos e instalações, regulando assim o conforto acústico dos espaços.

Nos quadros 5.1 a 5.6 apresentam-se os valores limites dos parâmetros acústicos a respeitar pelos estabelecimentos escolares e de investigação segundo o RRAE. O RRAE utiliza um factor I que se refere à Incerteza da medição, que deve ser adicionado aos valores medidos e que toma os seguintes valores de acordo com os parâmetros acústicos:

- $I = -3$  dB para os  $L'_{nT,w}$  e  $L_{Ar,nT}$ ;
- $I = 3$  dB para os  $D_{nT,w}$  e  $D_{2m,nT,w}$ ;
- $I = -25\%$  do valor regulamentar para os TR.

Quadro 5.1 – Valores mínimos do índice de isolamento sonoro a ruídos de condução aérea de paredes exteriores ( $D_{2m,nT,w}$ ) em edifícios escolares segundo o RRAE [adaptado de 55]

Zonas (art 3º - RGR)	$D_{2m,nT,w}$ (dB)
Zonas sensíveis	28
Zonas mistas (ou sensíveis com grande infra-estrutura de transporte)	33

No caso da área translúcida ser maior do que 60% da área da parede, aos valores medidos devem ser acrescidos os parâmetros C ou  $C_{tr}$  conforme o tipo de ruído, tal como definido na NP EN ISO 717-1 [6].

Quadro 5.2 – Valores mínimos do índice de isolamento sonoro a ruídos de condução aérea ( $D_{nT,w}$ ) em edifícios escolares segundo o RRAE [55]

Locais de recepção – Locais de emissão	$D_{nT,w}$ (dB)		
	Salas de aula (*), de professores, administrativas	Bibliotecas e gabinetes médicos	Salas polivalentes e berçários
Salas de aula, de professores, administrativas	45	45	45
Salas de aula musical, salas polivalentes, refeitórios, ginásios e oficinas	55	58	50
Berçários	53	55	48
Corredores de grande circulação (**)	30	35	30

(\*) Incluindo salas de aula musical.

(\*\*) Considerando que haverá porta de comunicação com os locais receptores; se tal não for o caso, os valores indicados serão acrescidos de 15 dB.

Quadro 5.3 – Valores máximos do índice de isolamento sonoro a ruídos de percussão ( $L'_{nT,w}$ ) em edifícios escolares segundo o RRAE [adaptado de 55]

Locais de emissão	$L'_{nT,w}$ (dB)
Corredores de grande circulação, ginásio, refeitório ou oficina	60
Salas de aula, berçário ou salas polivalentes	65

Quadro 5.4 – Valores máximos do tempo de reverberação médio nas frequências de 500, 1000 e 2000 Hz em edifícios escolares segundo o RRAE [adaptado de 55]

Locais	Tempo de reverberação médio (500 a 2000 Hz) (s)	
	sem sistema de difusão de mensagens sonoras	com sistema de difusão de mensagens sonoras
Salas de aula, bibliotecas, salas polivalentes e refeitórios	$0,15 V^{1/3}$	
Ginásios	$0,15 V^{1/3}$	$0,12 V^{1/3}$



Quadro 5.5 – Valor mínimo da absorção sonora equivalente (A) em edifícios escolares segundo o RRAE [adaptado de 55]

Locais	A (m <sup>2</sup> )
Átrios e corredores de grande circulação	0,25 S

S – superfície de pavimento dos locais considerados

Quadro 5.6 – Valores máximos do nível de avaliação do ruído particular dos equipamentos (L<sub>Ar,nT</sub>) em edifícios escolares segundo o RRAE [adaptado de 55]

Locais	L <sub>Ar,nT</sub> (dB)	
	funcionamento contínuo	funcionamento intermitente
Salas de aula, de professores, polivalentes, administrativas, refeitórios, ginásios, oficinas, berçários, corredores de grande circulação	35	40
Bibliotecas	30	35

## 5.2. OUTROS PAÍSES

### 5.2.1. REINO UNIDO

No Reino Unido foi publicado em 2003 o *Building Bulletin 93 – Acoustic Design of Schools* (BB93) [5]. Este documento veio substituir as recomendações relativas à acústica dos espaços escolares presentes na versão de 1997 do *Building Bulletin 87* (BB87) [56]. O novo BB87 editado em 2003 apenas se refere aos requisitos térmicos, de iluminação, de ventilação e climatização e de abastecimento de água a respeitar pelos edifícios escolares.

O BB93 tem como principal objectivo ser um auxiliar a todos intervenientes na construção de escolas (engenheiros, arquitectos, donos de obra), fornecendo conselhos e orientações para o seu planeamento e concepção de modo a obter espaços perfeitamente adequados em termos acústicos para o ensino. Neste guia são indicados de uma forma exaustiva os valores ideais dos parâmetros acústicos, como o ruído de fundo, índice de isolamento sonoro a ruídos de condução aérea e de percussão, tempo de reverberação e STI, consoante a actividade a que se destina a sala (quadros 5.7 a 5.11). É também abordada a questão do controlo do ruído, quer o externo quer o interno, reforçando a ideia que acima de tudo é indispensável que a escola se situe em locais pouco afectados principalmente pelo ruído de tráfego.

No capítulo 3 deste documento são apresentados os princípios gerais relativos ao isolamento sonoro complementados pela apresentação de diferentes soluções construtivas de paredes, janelas, tectos e pavimentos e a sua influência na transmissão do ruído. Posteriormente são abordadas, em diferentes capítulos, as salas de aula mais vocacionadas para palavra e os casos mais específicos das salas destinadas ao ensino da música e salas preparadas para alunos com dificuldades auditivas. Por fim o BB93 apresenta 10 casos de estudo completamente distintos que englobam desde salas em escolas primárias e secundárias, corredores, salas para música, salas para deficientes auditivos, entre outros, servindo assim de exemplo para casos semelhantes.

Quadro 5.7 – Valores máximos do nível sonoro contínuo equivalente do ruído de fundo ( $L_{Aeq}$ ) em edifícios escolares segundo o BB93 [adaptado de 5]

Tipo de sala	Ruído na sala emissora	Tolerância ao ruído da sala receptora	$L_{Aeq}$ (dB)
Salas de infantários	elevado	baixo	35
Salas de aula – escolas primárias	médio	baixa	35
Salas da aula – escolas secundárias	médio	baixa	35
Salas de aula <i>open-plan</i>	médio	média	40
Salas de música	muito elevado	baixa	35
Auditório (menos 50 pessoas)	médio	baixa	35
Auditório (mais de 50 pessoas)	médio	muito baixa	30
Salas de aula para alunos com dificuldades auditivas	médio	muito baixa	30
Salas de estudo	baixo	baixa	35
Biblioteca – zona de estudo	baixo	baixa	35
Biblioteca – zona de pesquisa	médio	média	40
Laboratórios	médio	média	40
Estúdio de teatro	elevado	muito baixa	30
Oficinas	elevado	alta	40
Salas de desenho	médio	média	40
Salas polivalentes	elevado	baixa	35
Salas de audiovisual, vídeo-conferência	médio	baixa	35
Átrio, corredores	médio	média	45
Estúdio de dança	elevado	médio	40
Ginásio	elevado	média	40
Piscina	elevado	alta	50
Posto médico	baixo	baixa	35
Cantina	elevado	alta	45
Cozinha	elevado	alta	50
Salas administrativas, salas de professores	médio	média	40
Balneários	elevado	alta	45
Casas de banho	médio	alta	50

Quadro 5.8 – Valores mínimos do índice de isolamento sonoro a ruídos de condução aérea ( $D_{nT,w}$ ) em edifícios escolares segundo o BB93 [adaptado de 5]

$D_{nT,w}$ (dB)		Ruído na sala emissora			
		Baixo	Médio	Elevado	Muito Elevado
Tolerância ao ruído da sala receptora	Alta	30	35	45	55
	Média	35	40	50	55
	Baixa	40	45	55	55
	Muito baixa	45	50	55	60

Quadro 5.9 – Valores máximos do índice de isolamento sonoro a ruídos de percussão ( $L'_{nT,w}$ ) em edifícios escolares segundo o BB93 [adaptado de 5]

Tipo de sala	$L'_{nT,w}$ (dB)
Salas de infantários	65
Salas de aula – escolas primárias e secundárias	60
Salas de aula <i>open-plan</i>	60
Salas de música	55
Auditório (menos 50 pessoas)	60
Auditório (mais de 50 pessoas)	55
Salas de aula para alunos com dificuldades auditivas	55
Salas de estudo e biblioteca	60
Laboratórios	65
Estúdio de teatro	55
Oficinas	65
Salas de desenho	60
Salas polivalentes	65
Salas de audiovisual, vídeo-conferência	60
Átrio, corredores	65
Estúdio de dança	60
Ginásio e piscina	65
Posto médico	60
Cantina, cozinha, balneários, casas de banho	65
Salas administrativas, salas de professores	65

Quadro 5.10 – Valores máximos do tempo de reverberação médio nas frequências de 500, 1000 e 2000 Hz em edifícios escolares segundo o BB93 [adaptado de 5]

Tipo de sala	TR (dB)
Salas de infantários e escolas primárias	0,6
Salas de aula – escolas primárias	0,6
Salas da aula – escolas secundárias	0,8
Salas de aula <i>open-plan</i>	0,8
Salas de música	1,0
Auditório (menos 50 pessoas)	0,8
Auditório (mais de 50 pessoas)	1,0
Salas de aula para alunos com dificuldades auditivas	0,4
Salas de estudo	0,8
Biblioteca	1,0
Laboratórios	0,8
Estúdio de teatro	1,0
Oficinas	0,8
Salas de desenho	0,8
Salas polivalentes	0,8 – 1,2
Salas de audiovisual, vídeo-conferência	0,8
Átrio, corredores	1,5
Estúdio de dança	1,2
Ginásio	1,5
Piscina	2,0
Posto médico	0,8
Cantina	1,0
Cozinha, balneários, casas de banho	1,5
Salas administrativas, salas de professores	1,0

Quadro 5.11 – Valores máximos do *Speech Transmission Index* (STI) em edifícios escolares segundo o BB93 [adaptado de 5]

Tipo de sala	STI
Salas de aula <i>open-plan</i>	0,6

## 5.2.2. ESTADOS UNIDOS DA AMÉRICA

No caso dos Estados Unidos da América, surgiu em 2000 uma publicação destinada a alertar os engenheiros, arquitectos, directores, professores e pais para a importância da acústica na aprendizagem dos alunos, o *Classroom Acoustics* [57]. Já em 1998 os EUA tinham em marcha um grande programa de reabilitação e construção de escolas mas não havia documentos de apoio, falha que veio depois ser colmatada com esta publicação. Neste documento as principais recomendações são relativamente à concepção acústica das salas de aula e mas também há orientações sobre a acústica das cafetarias, ginásios e auditórios.

Segundo esta publicação, o tempo de reverberação das salas de aulas deve situar-se entre os 0,4 e 0,6 s, recorrendo-se à diminuição do volume ou ao aumento da absorção sonora das salas para reduzir o tempo de reverberação. A colocação de materiais absorventes deve ser feita de uma forma criteriosa de modo a reduzir quer o tempo de reverberação, quer os ecos. No entanto, este documento também refere a necessidade de usar as reflexões como forma de aumentar o nível sonoro da voz do orador no fundo da sala. Relativamente ao ruído dos equipamentos mecânicos, é mencionado que para haver uma boa inteligibilidade da palavra a relação sinal/ruído não deve ser inferior a 10 dB ou 15 dB, no caso de serem crianças com dificuldades auditivas, e que o ruído de fundo nas salas de aula não deve ser superior a NC25 ou NC30 nem exceder os 35 dB(A). A localização, instalação e o tipo de equipamentos escolhidos deve ser alvo de um planeamento cuidado para reduzir ao máximo o ruído produzido.

Neste documento também são apresentadas as principais fragilidades das soluções construtivas leves muito utilizadas nos EUA para a construção de paredes divisórias. Estas soluções são mais acessíveis em termos de custos mas não têm grande isolamento sonoro, daí ser necessário recorrer a disposições construtivas com mais massa. Na figura 5.1 estão representadas, da pior para a melhor, três soluções construtivas de paredes com placas de gesso cartonado. Relativamente às paredes exteriores, as principais preocupações residem no fraco isolamento sonoro das janelas, apontando como solução a colocação de janelas duplas para aumentar o isolamento sonoro.

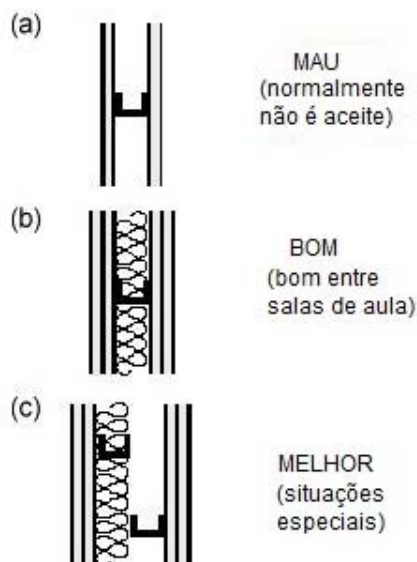


Figura 5.1 – Três soluções de paredes divisórias com placas de gesso cartonado em ordem crescente de isolamento sonoro: (a) uma placa de gesso cartonado em cada lado, (b) duas de placas de gesso cartonado em cada lado com isolamento de fibra de vidro, (c) duas placas de gesso cartonado em cada lado com isolamento de fibra de vidro com apoios distintos [adaptado de 57]

Por fim, conjugando todas as recomendações, é apresentada a melhor concepção acústica para as salas de aula: tecto com materiais absorventes excepto no meio e na parte da frente da sala, onde tem uma superfície dura para reflectir a voz do professor para o fundo da sala, paredes com materiais absorventes para reduzir o tempo de reverberação e piso com alcatifa (figura 5.2).

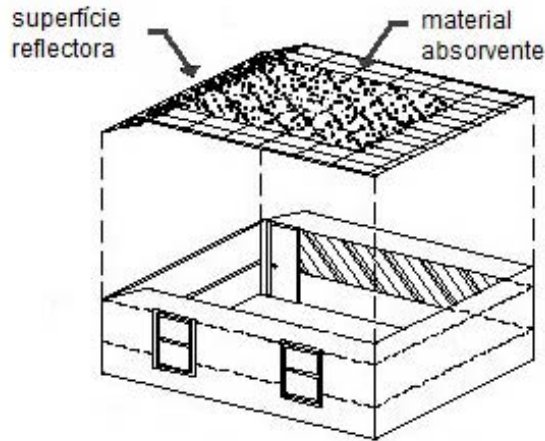


Figura 5.2 – Concepção acústica ideal de uma sala de aula segundo o *Classroom Acoustics*: tecto com material absorvente excepto no meio e na frente da sala, onde tem superfícies reflectoras, paredes com materiais absorventes e piso com alcatifa [adaptado de 57]

Relativamente aos ginásios e cafetarias, uma das soluções indicadas para reduzir o elevado tempo de reverberação é a colocação de *baffles*, grandes almofadas de materiais porosos e fibrosos suspensas, que têm a vantagem de aumentar a área de absorção (relativamente à hipótese de revestir o tecto na horizontal) e actuam nas duas faces. O caso dos auditórios é especial uma vez que se destinam a diferentes actividades, como o teatro, a dança e a música, tendo cada uma requisitos acústicos distintos. As orientações dadas pelo *Classroom Acoustics* são: conceber um espaço adequado para todos os fins mas que nunca é perfeito em nenhum ou optar por uma sala com acústica variável que se adapta às diferentes situações. A acústica variável obtém-se pela colocação de cortinas, painéis e outros mecanismos que podem ser modificados para alterarem as reflexões e a reverberação (figura 5.3).

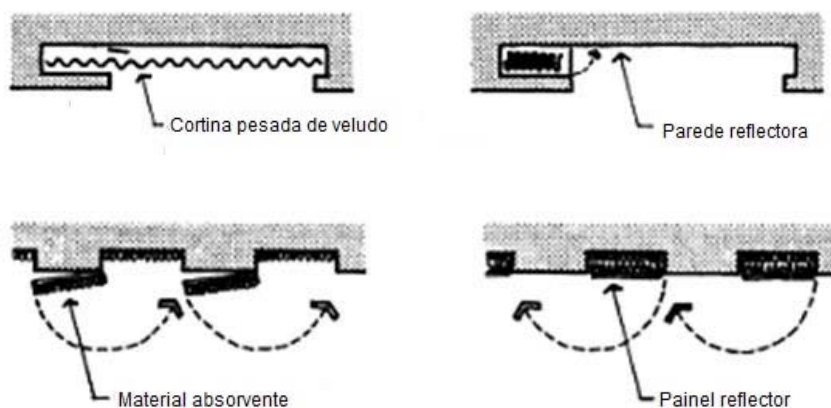


Figura 5.3 – Exemplo de dois mecanismos de absorção variável que permitem alterar as características acústicas de uma sala [adaptado de 58]

As questões e preocupações lançadas por este documento infelizmente, apesar do avançar dos anos, ainda são muito actuais, tais como “porque é que as salas de aula têm muitos problemas acústicos quando as soluções não excessivamente caras” e “a principal razão para os problemas acústicos das salas não é a falta de fundos mas sim a falta de sensibilização para o problema”.

Em 2002 é publicada a norma ANSI 12.60 [59] que define os critérios e os requisitos a respeitar pelos edifícios escolares nos EUA, para além de fornecer informação acerca das boas práticas de concepção e construção para obter espaços que estejam em conformidade com a norma. Esta norma possui ainda um segundo volume, publicado em 2009, que diz respeito aos critérios e requisitos acústicos de salas amovíveis. Nos quadros 5.12 a 5.14 apresentam-se alguns valores limite preconizados na norma.

Quadro 5.12 – Valores máximos do ruído de fundo e do tempo de reverberação segundo a ANSI 12.60 [adaptado de 59]

Volume do espaço	Nível sonoro contínuo equivalente do ruído de fundo ( $L_{Aeq,60min}$ ) (dB)	Tempo de reverberação médio nas frequências de 500, 1000 e 2000 Hz
$\leq 283 \text{ m}^3$	35	0,6
$283 \text{ m}^3 < V \leq 566 \text{ m}^3$	35	0,7
$> 566 \text{ m}^3$ e todos os espaços auxiliares	40 <sup>a)</sup>	b)

a) Se os corredores tiverem apenas a função de passagem admitir 45 dB.

b) Tratamento com materiais absorventes em 75% da área total.

Quadro 5.13 – Valores mínimos do índice de redução sonora ( $R_w$ ) entre salas de aula e diferentes espaços adjacentes segundo a ANSI 12.60 [adaptado de 59]

Espaço adjacente			
Sala de aula, posto médico e exterior	Casa de banho	Corredor <sup>a)</sup> , escadas, gabinetes <sup>a,b)</sup> , auditórios <sup>a,b)</sup>	Sala de música, de máquinas, cafeteria, ginásio, piscina
50	53	45	60

a) Existindo uma porta de entrada na parede de separação, a parede deverá ter o  $R_w$  indicado no quadro e a porta deverá ter um  $R_w$  de 30 dB ou superior.

b) Se a privacidade da palavra for fundamental nos gabinetes e auditórios, aumentar  $R_w$  para 50 dB.

Quadro 5.14 – Valores mínimos do índice de redução sonora ( $R_w$ ) entre diferentes espaços adjacentes segundo a ANSI 12.60 [adaptado de 59]

Locais de emissão – Locais de recepção	Corredores, escadas, casas de banho	Salas de música	Gabinetes <sup>a)</sup> , auditórios <sup>a)</sup>	Exterior	Salas de máquinas, cafetaria, ginásio, piscina
Corredores	45	60 <sup>c)</sup>	45 <sup>b)</sup>	45 <sup>c)</sup>	55 <sup>c)</sup>
Sala de música	60	60	60	45	60
Gabinetes, auditórios	45	60	45 <sup>b)</sup>	45	60

a) Existindo uma porta de entrada na parede de separação, a parede deverá ter o  $R_w$  indicado no quadro e a porta deverá ter um  $R_w$  de 30 dB ou superior.

b) Se a privacidade da palavra for fundamental, aumentar  $R_w$  para 50 dB.

c) Caso o corredor não seja usado como espaço de ensino auxiliar,  $R_w$  poderá ser reduzido para 45 dB ou 40 dB nas paredes exteriores.

### 5.2.3. NOVA ZELÂNDIA

Por iniciativa do Ministério da Educação da Nova Zelândia foram preparados e publicados uma série de documentos orientadores destinados a directores e gestores de escolas para os ajudar a avaliar o desempenho dos diferentes locais de ensino da escola e informar sobre as características que esses espaços devem possuir para serem espaços mais adequados para a aprendizagem. Estes documentos incidem sobre diferentes factores como a qualidade do ar interior, a ventilação e climatização, a iluminação e a acústica.

A publicação relativa à qualidade acústica dos espaços escolares, *Designing Quality Learning Spaces: Acoustics* [9], explica, de uma forma mais informal, os conceitos básicos relativos à acústica e de que forma é que esta pode prejudicar o processo de ensino das crianças. Tal como o BB93, também apresenta uma série de soluções construtivas para melhorar os diferentes parâmetros acústicos de uma sala ou corredor, consoante o tipo de ruído e a sua fonte. Em termos de salas com utilizações mais especiais, como salas polivalentes, ou mais específicas, como ginásios, bibliotecas, salas de música, salas de desenho e oficinas, este documento fornece uma série de indicações aos directores das escolas por forma a conseguirem controlar o ruído de fundo, tempo de reverberação e o isolamento sonoro nestas salas mais particulares.

Outro grande objectivo desta publicação é dar ferramentas aos directores e gestores das escolas para interpelarem os construtores sobre os requisitos a cumprir pelo edifício, caso seja necessária qualquer intervenção na escola. Deste modo está incluído um capítulo onde são indicados os diferentes passos a tomar durante e depois da obra e os regulamentos e normas que o edifício deve respeitar, destacando-se a AS/NZ 2107 [60]. Esta norma indica os valores limite do ruído de fundo e do tempo de reverberação para um conjunto de edifícios, incluindo as escolas (quadro 5.15). No quadro 5.16 apresentam-se os valores mínimos recomendados para o índice de redução sonora.



Quadro 5.15 – Valores máximos do tempo de reverberação e ruído de fundo segundo a AS/NZ 2107 [adaptado de 9]

Locais	Ruído de fundo (dB)	Tempo de reverberação* (s)
Salas de desenho	40	0,5-0,7
Salas de aula – escola primária	35	0,4
Salas de aula – escola secundária	35	0,5
Salas de aula para alunos com dificuldades auditivas	30	0,4
Salas de informática	40	0,5
Laboratórios	35-40	0,5-0,6
Bibliotecas	35-40	0,5-0,8
Salas de música	35	0,3-1,4 <sup>a)</sup>
Salas de aula <i>open-plan</i>	40	0,4
Oficinas	40	b)

a) Depende do fim a que se destina a sala, o volume e o pé-direito.

\* Não é mencionado em que frequência

b) O menor possível mas não deve exceder os 0,8 s.

Quadro 5.16 – Valores mínimos do índice de redução sonora ( $R_w$ ) recomendados na Nova Zelândia [adaptado de 9]

Locais de emissão – Locais de recepção	Biblioteca, sala de estudo	Sala de aula	Sala polivalente	Oficinas – ruído moderado	Oficinas – ruído elevado	Ginásio	Sala de música
Oficina	60	60	60	55	55	55	60
Ginásio	60	60	60	55	55	55	60
Sala de aula	50	50	60	50	60 <sup>(1)</sup>	60 <sup>(1)</sup>	60
Sala polivalente	60	60	60	55	60 <sup>(1)</sup>	60	60
Biblioteca, sala de estudo	45	50	60	50	60 <sup>(1)</sup>	60	60
Sala de música	60	60	60	60	60 <sup>(1)</sup>	60 <sup>(1)</sup>	60

(1) Idealmente estas salas não deverão ficar directamente adjacentes

### 5.3. COMPARAÇÃO ENTRE PAÍSES

No quadro 5.17 apresenta-se a comparação dos valores regulamentares dos quatro países anteriormente mencionados para quatro situações diferentes: isolamento sonoro a ruídos de condução aérea entre salas de aula, isolamento sonoro a ruídos de condução aérea entre salas de aula e corredores, tempo de reverberação máximo nas salas de aula e nas bibliotecas.

Quadro 5.17 – Comparação entre Portugal, Reino Unido, EUA e Nova Zelândia dos valores regulamentares para quatro situações

	Portugal	Reino Unido	EUA	Nova Zelândia
Isolamento sonoro a ruídos de condução aérea entre salas de aula (dB)	45 <sup>a)</sup>	45 <sup>a)</sup>	50 <sup>b)</sup> 48 <sup>c)</sup>	50 <sup>b)</sup> 48 <sup>c)</sup>
Isolamento sonoro a ruídos de condução aérea entre salas de aula e corredores (dB)	30 <sup>a)</sup>	45 <sup>a)</sup>	45 <sup>b)</sup> 43 <sup>c)</sup>	–
TR médio nas salas de aula (s) (V=200 m <sup>3</sup> )	0,9	0,8	0,6	0,5
TR médio nas bibliotecas (s) (V=500 m <sup>3</sup> )	1,2	1,0	0,7	0,8

a)  $D_{nT,w}$

b)  $R_w$  (ou STC)

c) Previsível  $D_{nT,w}$

Analisando o isolamento sonoro a ruídos de condução aérea entre salas de aula, verifica-se uma consonância entre o valor mínimo de  $D_{nT,w}$  estabelecido nos regulamentos português e britânico. Os limites definidos pelas normas norte-americana e neozelandesa são superiores uma vez que se tratam de valores obtidos em laboratório, não sendo por isso contabilizadas as transmissões marginais. Ainda que de um modo muito simplificado, é possível obter o valor previsível de  $D_{nT,w}$  subtraindo duas unidades ao valor laboratorial [1]. Contabilizando com as transmissões marginais, os limites da ANSI 12.60 e da AS/NZ 2107 são os mais exigentes.

No isolamento sonoro a ruídos de condução aérea entre salas de aula e corredores o regulamento português define um valor mínimo de  $D_{nT,w}$  inferior ao do BB93, sendo por isso menos exigente. O valor preconizado na ANSI 12.60 apesar de ser igual ao do BB93, refere-se novamente a um valor laboratorial. Utilizando a simplificação anteriormente referida, verifica-se que o limite do regulamento britânico é o mais exigente.

Relativamente ao tempo de reverberação, no Reino Unido e na Nova Zelândia o valor máximo para as salas de aula e bibliotecas é definido independentemente do volume da sala, por oposição a Portugal e aos EUA onde o valor regulamentar é em função do volume do espaço, existindo assim algumas discrepâncias entre os diferentes limites. Para esta comparação considerou-se o volume da sala de aula de 200 m<sup>3</sup> e o da biblioteca de 500 m<sup>3</sup>. O valor de 0,9 s para o tempo de reverberação máximo nas salas de aulas com 200 m<sup>3</sup> estabelecido pelo RRAE é o mais elevado dos quatro países. Comparando com o outro país europeu, a diferença não é muito significativa, mas comparando com os valores dos EUA e da Nova Zelândia a diferença acentua-se, com a agravante destes dois valores estarem mais adequados a uma boa inteligibilidade da palavra.

No caso das bibliotecas o limite português é também o mais elevado, muito por culpa da fórmula de cálculo presente no RRAE (quadro 5.4). A maior diferença regista-se comparando com o regulamento dos EUA, atingindo um valor de 0,5 s. A ANSI 12.60 define o valor limite do tempo de reverberação em função do volume mas não recorre a fórmulas de cálculo. Nesta situação é o regulamento mais

exigente, aumentando em apenas 0,1 s o valor máximo do tempo de reverberação relativamente ao das salas de aula. Pelo facto de serem locais com um grande volume, torna-se mais difícil obter tempos de reverberação muito baixos nas bibliotecas.

De um modo geral pode-se concluir que o RRAE é o regulamento menos exigente, principalmente nos tempos de reverberação. A fórmula de cálculo do RRAE leva a valores muito elevados do tempo de reverberação com o aumento do volume. Esta situação é particularmente grave em bibliotecas por se tratarem de espaços de leitura e de pesquisa, necessitando por isso de condições acústicas cuidadas. Por oposição, a norma ANSI 12.60 é a mais exigente apesar do isolamento sonoro entre salas de aula e corredores não ser o mais elevado. Os valores limite definidos por esta norma para os isolamentos sonoros analisados naturalmente que diminuem com a contabilização das transmissões marginais, mas são elevados.



# 6

## ESCOLA SECUNDÁRIA RODRIGUES DE FREITAS

### 6.1. CARACTERIZAÇÃO

A origem da Escola Secundária Rodrigues de Freitas remonta à reforma educativa de 1836 do jovem ministro Manuel da Silva Passos, conhecido por Passos Manuel, que criou, entre outros, o liceu Nacional do Porto. No início do século XX a cidade do Porto foi dividida em duas zonas escolares [61], correspondendo a cada uma o seu liceu: o Liceu Central da 1ª zona (oriental), que mais tarde deu origem ao Liceu Alexandre Herculano, foi inicialmente instalado na rua do Sol e o Liceu Central da 2ª zona (ocidental) ocupou as instalações do Liceu Nacional do Porto, na rua de São Bento da Vitória [62].

Em 1908 a designação do Liceu da 2ª zona passa a ser Liceu D. Manuel II mas com a implantação da República é-lhe atribuído, em homenagem a José Joaquim Rodrigues de Freitas, o primeiro deputado republicano pelo Porto, o nome de Liceu Rodrigues de Freitas. Em plena Ditadura Nacional o edifício retomou a sua designação monárquica [63], tendo assumido após a revolução de 1974 o nome actual de Escola Secundária Rodrigues de Freitas.

A concretização do actual edifício da Escola Secundária Rodrigues de Freitas, situado na Praceta Pedro Nunes, na freguesia de Cedofeita no Porto, surgiu após 1910, no seguimento da apresentação no Parlamento de um projecto de construção de dois edifícios de raiz para os dois liceus da cidade. A escola, cujo projecto é da autoria do arquitecto Marques da Silva, começou a ser construída em 1927 e foi ocupada em 1933 (figura 6.1). A meio da década de 1950 foi alvo de uma intervenção que permitiu aumentar a capacidade para 1500 alunos, da autoria do arquitecto Fernandes de Sá.



Figura 6.1 – Escola Secundária Rodrigues de Freitas no Porto [61]

A escola é composta por um edifício único com um corpo central elevado que se desenvolve simetricamente em planta (figura 6.2), com um eixo central a marcar a zona administrativa e os restantes eixos a ordenar os corredores de circulação, formando uma planta quadrangular. A fachada principal também respeita uma composição simétrica destacando-se as grandes aberturas, a decoração vegetalista, os azulejos e diferentes elementos em relevo (figura 6.3). Todos estes ornamentos arquitectónicos e os demais acessórios, como as guardas em ferro das escadas de madeira que estabelecem a ligação entre os pisos da escola, evidenciam as diferentes influências do arquitecto provenientes do seu percurso profissional.

Um relatório de inspecção e diagnóstico elaborado pelo Instituto da Construção da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (IC) antes das obras [64] refere como materiais presentes na construção o granito, a madeira e os elementos em betão armado. Em termos de sistemas construtivos, as paredes são de alvenaria de granito, os pisos têm vigamento de madeira ou vigas e lajes em betão armado, coberturas com estrutura de madeira e as escadas são em betão armado (pisos -1 e 0) ou em madeira (pisos superiores). A argamassa de saibro e cal com acabamento a tinta e os azulejos são os revestimentos exteriores enquanto que no interior são soalho em madeira, mármore na entrada, ladrilhos cerâmicos nas zonas técnicas (arrumos, arrecadações e casas de banho), rebocos e estuques.

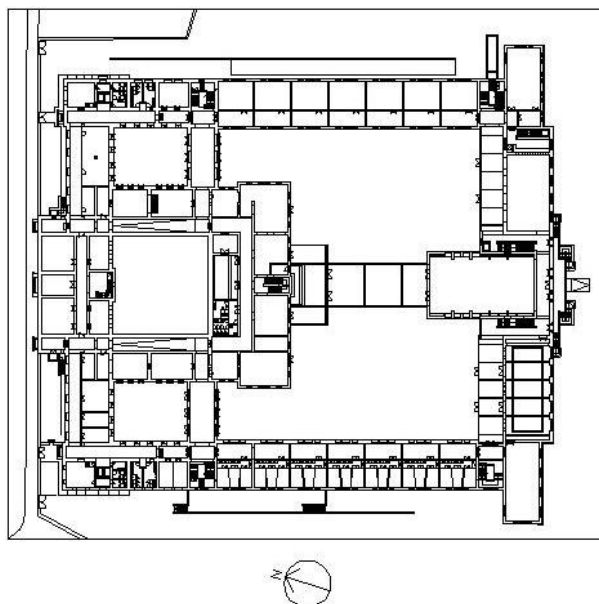


Figura 6.2 – Planta da Escola Secundária Rodrigues de Freitas (sem escala) [65]



Figura 6.3 – Fachada do corpo central da Escola Secundária Rodrigues de Freitas [61]

A organização funcional da escola ao longo dos tempos foi sofrendo múltiplas modificações muito devido ao forte crescimento da população escolar, tendo chegado a atingir os 6000 alunos, e aos diferentes currículos escolares que foram surgindo no sistema de ensino português. Uma vez que a escola tinha sido projectada para um número mais reduzido de alunos, nos anos 1970 e 1980 adaptaram-se espaços para salas de aula e foram construídos pavilhões pré-fabricados localizados no recreio.

No entanto, o cenário mais recente da escola caracterizava-se por uma evidente degradação de todo o espaço escolar, em grande parte devido à falta de manutenção, e um elevado subaproveitamento motivado pela diminuição do número de alunos verificada desde os anos 1990 [61]. O piso -2, que se desenvolve ao longo da ala poente e fachada sul, incluía uma piscina desactivada e respectivos balneários, cantina e espaços de apoio ao anfiteatro construído por volta dos anos 1950/60.

O piso -1, no corpo sul, era composto pelo anfiteatro, galeria da piscina e dois ginásios, enquanto que as alas nascente e poente eram integralmente constituídas por salas de aula. A ala norte neste piso englobava caves, que eram utilizadas como arquivos e arrecadações, e oficinas e salas de formação no corpo central.

No piso 0 do corpo norte funcionava, junto à entrada, a recepção, os serviços administrativos e os gabinetes da direcção e à volta do pátio central situavam-se os laboratórios. O corpo nascente e poente eram ocupados por salas de aula e grandes salas de desenho nos topos sul. O grande ginásio localizava-se na ala sul, sobre o anfiteatro.

O piso 1 continha, no corpo nascente, salas de aula e uma sala de desenho no topo, e, no corpo norte, o antigo salão nobre adaptado a museu da escola, bem como mais algumas salas. Os pisos 2 e 3 desenvolvem-se apenas no corpo norte, restringindo-se o último apenas ao corpo central. As antigas residências do reitor e do pessoal administrativo e auxiliar situadas nos topos da fachada principal haviam sido reconvertidas em instalações da Direcção Regional de Educação do Norte (DREN) e em centro de formação de professores. No piso 2 do corpo central localizava-se a biblioteca e no piso 3 uma galeria, o arquivo e um depósito de água.

Os pavilhões pré-fabricados anteriormente referidos já não tinham qualquer utilização. Havia ainda uns pavilhões junto ao corpo poente que albergavam serviços da DREN e um pavilhão polidesportivo, bem como uma grande área asfaltada que servia de campo de jogos. Na figura 6.4 é possível observar a inserção de todos estes elementos bem como alguns trabalhos da obra.



Figura 6.4 – Vista aérea da Escola Secundária Rodrigues de Freitas numa fase inicial da obra (2007) [66]

## **6.2. INTERVENÇÃO EFECTUADA**

### **6.2.1. ASPECTOS GERAIS**

Seguindo o espírito do programa de modernização, o programa de intervenção pensado para a Escola Secundária Rodrigues de Freitas visava recuperar todo o edifício do ponto de vista construtivo e funcional, criando uma escola moderna, perfeitamente adaptada aos novos paradigmas curriculares, respeitando todos os parâmetros de conforto [61]. No entanto, toda esta iniciativa teve de ter em atenção o facto de se tratar de um edifício que faz parte do conjunto de obras do arquitecto Marques da Silva em vias de classificação pelo Instituto de Gestão do Património Arquitectónico e Arqueológico (IGESPAR), cujas características arquitectónicas era obrigatório preservar. Esta restrição tornou ainda mais inevitável uma profunda ponderação acerca das soluções a aplicar tendo em conta as exigências dos regulamentos, os resultados e o custo final da obra.

Com esta reabilitação também foi alargada a oferta de ensino da escola, passando a integrar o 2º ciclo do ensino básico [61]. Conjugando o facto de nos últimos anos o número de alunos ser cada vez mais diminuto e as condições precárias em que o Conservatório de Música do Porto se encontrava, ficou estabelecido que o edifício passaria também a albergar aquela instituição. A construção de um novo pavilhão gimno-desportivo estava igualmente contemplada no programa de intervenção, assim como o tratamento de todas as zonas exteriores.

As obras de modernização consistiram também em dotar toda a escola de aparelhos de climatização e ventilação, fazer a correcção acústica e o isolamento sonoro da cada uma das salas, a impermeabilização contra as humidades e o reforço estrutural das zonas mais vulneráveis, como por exemplo as coberturas, as caixilharias e os pavimentos. Foi feita a reformulação e a substituição das instalações hidráulicas, eléctricas e de comunicações e também a instalação de elevadores para facilitar o acesso de todos os utilizadores ao espaço escolar. Para melhorar as condições de habitabilidade das caves foram desaterrados os dois pátios laterais [61].

A Escola Secundária Rodrigues de Freitas passou a estar instalada no corpo nascente, onde se situam, em todos os pisos, as salas de aula e, no topo sul, salas de desenho (pisos 1 e 0) ou um pequeno ginásio (piso -1), e em parte do corpo norte, estando o piso de entrada reservado para a direcção e gabinetes de atendimento e, à volta do pátio central, os laboratórios e salas de informática. No piso -1 localizam-se salas específicas para, por exemplo, Educação Visual e Tecnológica e fotografia, e os arquivos e zonas técnicas logo por baixo da entrada. Viradas para o pátio de recreio, localizam-se a cafetaria e salas de convívio. No corpo central, o piso 1 fica ocupado com o museu enquanto que o restante do corpo norte fica com salas de formação. No piso 2 manteve-se a biblioteca e na antiga residência do reitor localizam-se os gabinetes dos professores e salas de reunião.

O Conservatório de Música do Porto ocupa agora a ala poente do edifício [61]. Apesar de permanecerem autónomos, esta convivência dos dois estabelecimentos de ensino implicou, para além da partilha de alguns espaços, a construção de novos edifícios devido à especificidade de algumas das actividades a que se destinam (auditório, salas para grupos instrumentais ou corais) (figuras 6.5 e 6.6). Nestes novos edifícios também está incluída uma escola do 1º ciclo do ensino integrado vocacionado para a música. O corpo poente é ocupado por salas de aula do 2º e 3º ciclo do ensino integrado e salas de dimensão variável para a aprendizagem de diversos instrumentos musicais. Na parte norte situam-se os serviços administrativos, a sala dos professores e áreas de atendimento.





Figura 6.5 – Auditório das novas instalações para o Conservatório de Música do Porto [61]



Figura 6.6 – Novo edifício construído para albergar algumas valências do Conservatório de Música do Porto [61]

No corpo sul situam-se os ginásios, a cantina e a grande sala polivalente e no exterior o pavilhão desportivo (figura 6.7) e os campos descobertos [61]. Estes equipamentos, conjuntamente com a biblioteca, a cafetaria, as salas de convívio e o auditório, são passíveis de serem utilizados por toda a comunidade urbana envolvente uma vez que possuem uma certa autonomia de funcionamento, podendo ser utilizados fora do horário convencional. Nas zonas exteriores foram criadas zonas ajardinadas e arborizadas e foi colocado um revestimento do solo mais permeável (figura 6.8).

As figuras 6.9 a 6.12 apresentam, por piso e através de um código de cores, de que forma se organiza o espaço escolar: vermelho escuro corresponde a salas de aula, vermelho claro: salas de ciências e tecnologia, rosa escuro: salas de artes, rosa claro: oficinas, amarelo: áreas sociais ou de restauração, azul: área de docentes ou administrativa, verde: biblioteca ou salas polivalentes e laranja: área desportiva.



Figura 6.7 – Recreio da Escola Secundária Rodrigues de Freitas [67]



Figura 6.8 – Novo pavilhão gimno-desportivo da Escola Secundária Rodrigues de Freitas [61]

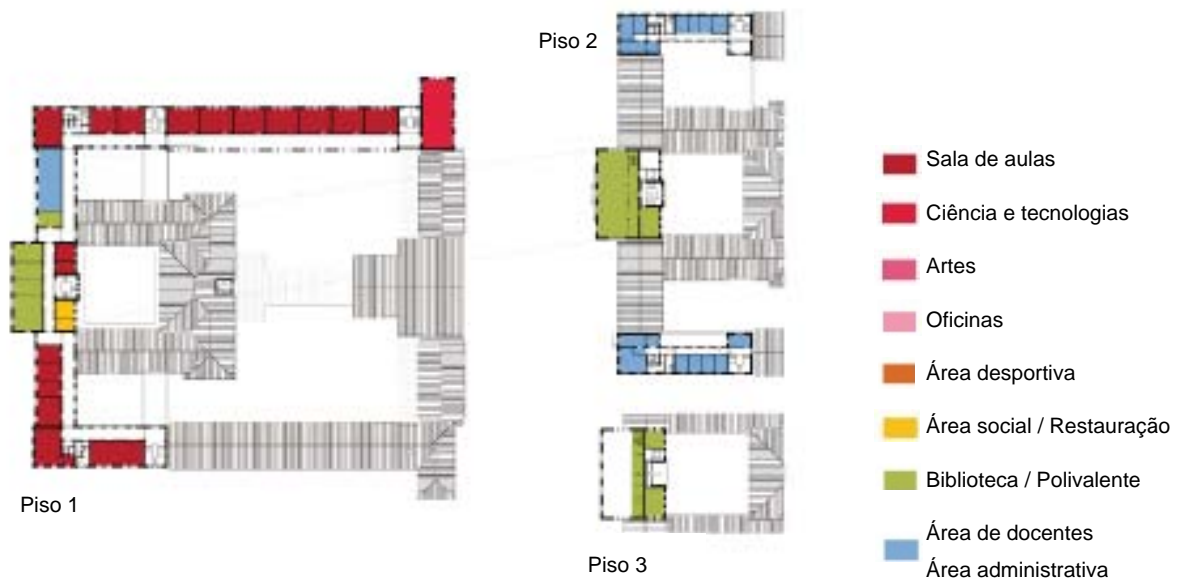


Figura 6.9 – Organização funcional dos pisos 1, 2 e 3 da Escola Secundária Rodrigues de Freitas [adaptado de 68]

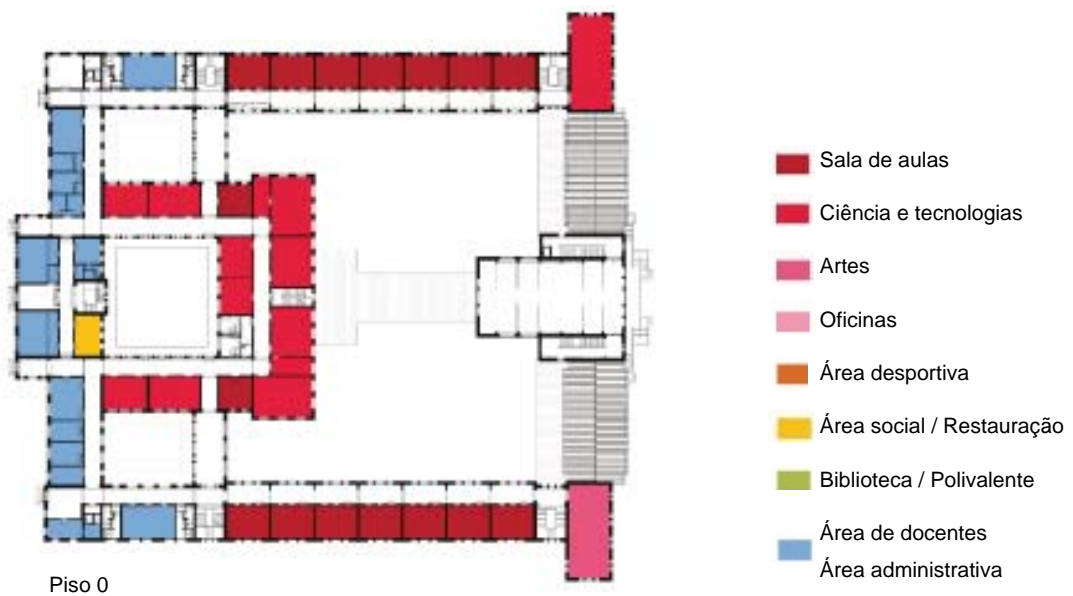


Figura 6.10 – Organização funcional do piso 0 da Escola Secundária Rodrigues de Freitas [adaptado de 68]

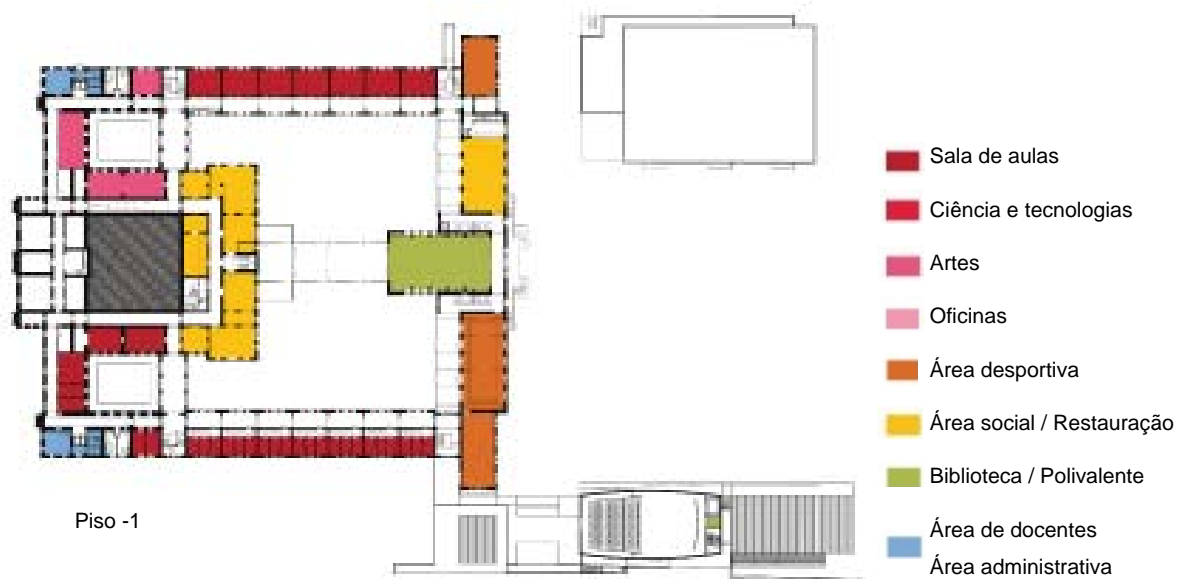


Figura 6.11 – Organização funcional do piso -1 da Escola Secundária Rodrigues de Freitas [adaptado de 68]

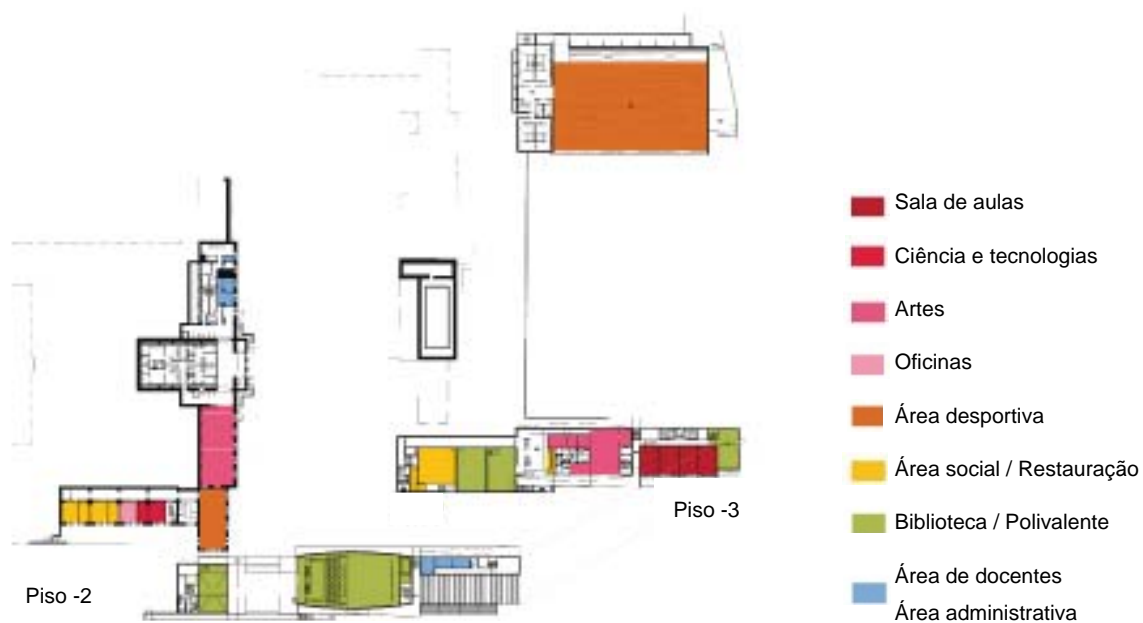


Figura 6.12 – Organização funcional dos pisos -2 e -3 da Escola Secundária Rodrigues de Freitas [adaptado de 68]

### 6.2.1. PROJECTO DE CONDICIONAMENTO ACÚSTICO

A intervenção na Escola Secundária Rodrigues de Freitas também incluiu a correcção acústica de todos os espaços escolares, tendo sido dimensionadas diferentes soluções construtivas, presentes no Projecto de Execução de Condicionamento Acústico [65], com o objectivo de cumprir os limites regulamentares dos parâmetros acústicos aplicáveis aos edifícios escolares.

A solução proposta para a fachada das salas de aula foi a 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 com caixa-de-ar de 6 mm. No caso da fachada da biblioteca, a opção foi a recuperação da caixilharia de madeira com vidro simples laminado devido às dimensões do envidraçado [65].

A solução apresentada para o tratamento dos orifícios para admissão de ar existentes na fachada das salas de aula foi a colocação de lã de rocha com 3 cm de espessura e  $40 \text{ kg/m}^3$  de densidade, um véu negro em fibra de vidro e uma chapa perfurada com 20 % de taxa mínima de perfuração ou uma rede metálica distendida.

Nas paredes de separação entre os corredores e as salas de aula, constituídas por duas janelas e uma porta de acesso, o projecto de condicionamento acústico previa a recuperação da caixilharia existente e aplicação de vidros laminados, a aplicação de almofada em contraplacado de madeira ou MDF de 9 mm de espessura perfazendo uma caixa-de-ar com a face da porta existente, preenchida com material absorvente sonoro tipo lã mineral, e a aplicação de borrachas de vedação em todo o perímetro da porta e janelas. O  $D_{n,w}$  previsto pelo projectista para esta solução construtiva era de 31 dB [65].

Uma vez que as paredes de separação entre salas de aula ou entre salas de aula e outros espaços são constituídas por alvenaria de granito com cerca de 30 cm de espessura e rebocadas, tendo por isso um elevado isolamento sonoro, não foi considerado qualquer reforço acústico das paredes.

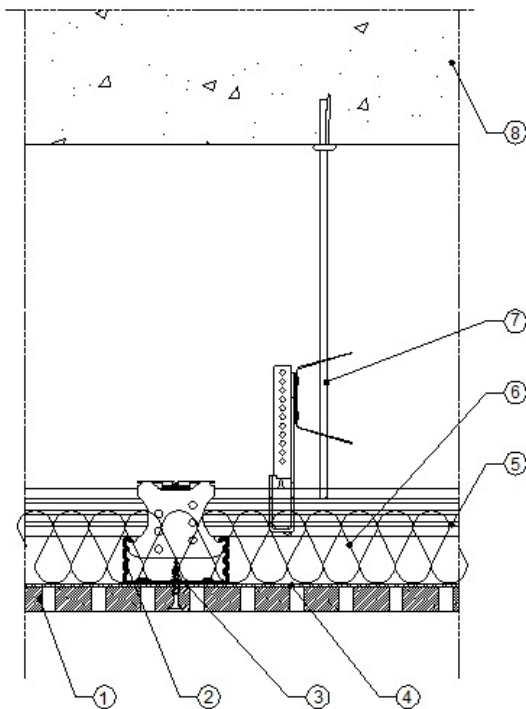
As soluções propostas para os elementos de separação vertical variam de piso para piso uma vez que as lajes têm disposições construtivas diferentes. Entre o piso 1 e o piso 0 manteve-se a laje de betão existente de 20 cm de espessura, aplicando-se apenas um tecto falso em gesso cartonado perfurado, com uma caixa-de-ar de 20 cm parcialmente preenchida com placas de lã de rocha de 40 mm de espessura e  $40 \text{ kg/m}^3$  de densidade, para controlo da reverberação (figura 6.13), estando previsto um  $D_{n,w}$  de 53 dB [65].

Entre o piso 0 e o piso -1 foi apresentada uma solução mais complexa para reforçar o isolamento entre pisos, uma vez que se trata de um elemento com vigamento de madeira. A solução construtiva dimensionada previa a remoção dos tectos existentes e a aplicação de um tecto constituído por duas placas de gesso cartonado de 12,5 mm de espessura, com uma caixa-de-ar com o soalho parcialmente preenchida com placas de lã de rocha de 100 mm de espessura e  $70 \text{ kg/m}^3$  de densidade. Tal como no piso superior, em todas as salas e corredores também foi dimensionado um tecto falso em gesso cartonado perfurado com placas de lã de rocha de 40 mm de espessura e  $40 \text{ kg/m}^3$  de densidade na caixa-de-ar (figura 6.14). Neste caso, o  $D_{n,w}$  previsto era de 55 dB [65].

Quanto aos índices de isolamento sonoro a ruídos de percussão, os resultados dos cálculos efectuados no projecto indicavam um  $L'_{n,w}$  de 61 dB entre o piso 1 e o piso 0 e de 55 dB entre o piso 0 e o piso -1 [65]. Os materiais de revestimento de piso considerados foram, em todas as salas de aula, soalho em régua de madeira e nos corredores um linóleo colado ao pavimento cerâmico antigo, no caso do piso 1, e colado a placas de MDF aplicadas sobre o vigamento existente, no caso do piso 0.

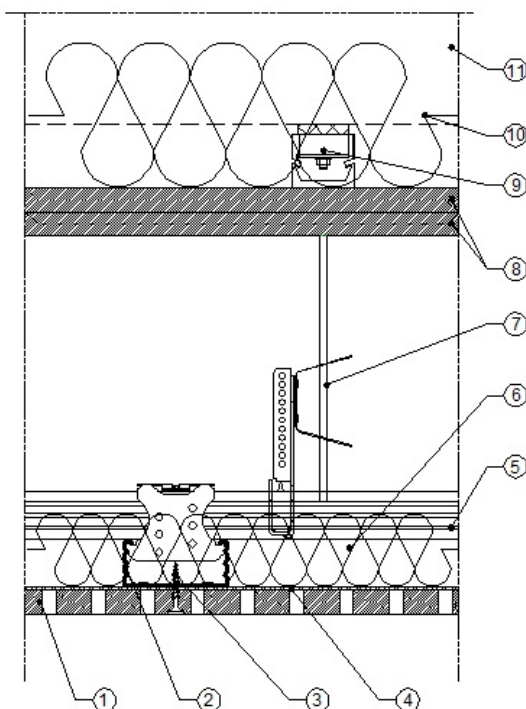
Relativamente ao ruído provocado pelos equipamentos de ventilação, as soluções a implementar passavam pela utilização de atenuadores sonoros nas condutas de ventilação entre os ventiladores e as

salas de aula, revestimento exterior das condutas, atenuadores sonoros na insuflação e extracção em 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.



- 1 – Placa de gesso cartonado perfurado de 12,5 mm de espessura e furos com 8 mm de diâmetro e 18 mm de entre-eixo;
- 2 – Perfil primário;
- 3 – Parafuso auto-roscante;
- 4 – Vêu negro anti-desagregante em fibra de vidro;
- 5 – Perfil secundário;
- 6 – Placas de lã de rocha de 40 mm de espessura e 40 kg/m<sup>3</sup> de densidade;
- 7 – Varão de fixação rígido;
- 8 – Laje.

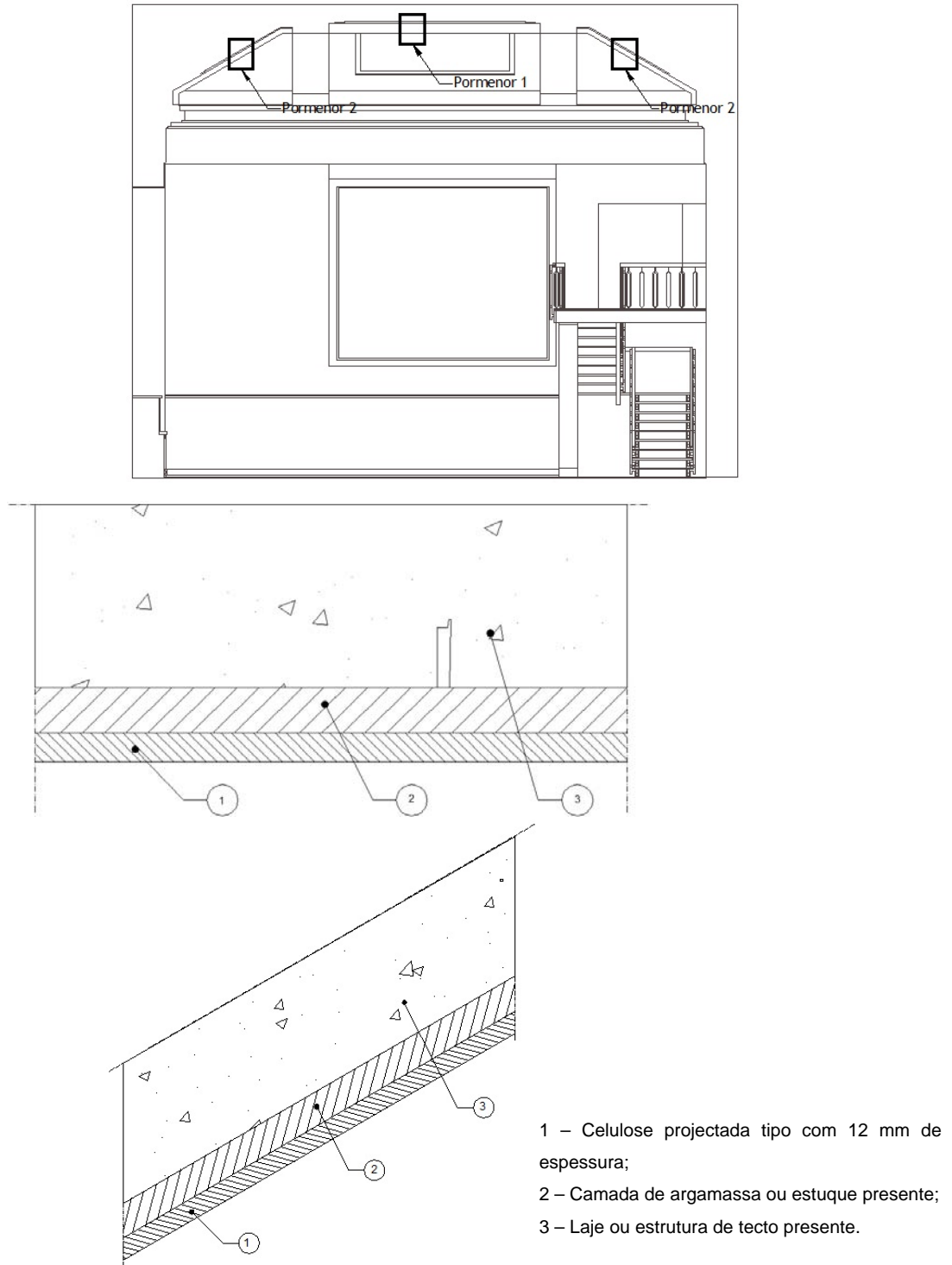
Figura 6.13 – Pormenor do tecto das salas de aula e dos corredores dos pisos 1 e 0 da Escola Secundária Rodrigues de Freitas (sem escala) [65]



- 1 – Placa de gesso cartonado perfurado de 12,5 mm de espessura e furos com 8 mm de diâmetro e 18 mm de entre-eixo;
- 2 – Perfil primário;
- 3 – Parafuso auto-roscante;
- 4 – Vêu negro anti-desagregante em fibra de vidro;
- 5 – Perfil secundário;
- 6 – Placas de lã de rocha de 40 mm de espessura e 40 kg/m<sup>3</sup> de densidade;
- 7 – Varão de fixação rígido;
- 8 – Placas de gesso cartonado liso com 12,5 mm de espessura;
- 9 – Suporte antivibrático;
- 10 – Placas de lã de rocha de 100 mm de espessura e 70 kg/m<sup>3</sup> de densidade;
- 11 – Vigas de madeira.

Figura 6.14 – Pormenor do tecto das salas de aula e dos corredores do piso -1 da Escola Secundária Rodrigues de Freitas (sem escala) [65]

Com o objectivo de controlar a reverberação, a solução presente no projecto de condicionamento acústico para o tecto da biblioteca e a face inferior da *mezzanine* existente consistia na projecção de 12 mm de um *spray* de absorção acústica à base de celulose. Esta solução permite intervir num dos espaços mais nobres da escola sem colidir com o seu aspecto e decoração. As figuras 6.15, 6.16 e 6.17 apresentam um corte construtivo da biblioteca e dois pormenores do tecto, respectivamente.



Figuras 6.15, 6.16 e 6.17 – Corte construtivo da biblioteca e dois pormenores da solução adoptada no tecto da biblioteca da Escola Secundária Rodrigues de Freitas (sem escala) [65]

A solução construtiva prevista para o pavilhão gimno-desportivo foi a aplicação de um tecto falso com painéis *Celenit N* de 50 mm de espessura, aparafusados a uma estrutura metálica fixada à estrutura de suporte da cobertura do pavilhão (figura 6.18), e a aplicação dos mesmos painéis nas paredes (figura 6.19). Estes painéis são compostos por fibras longas de madeira de abeto, mineralizadas e ligadas com cimento Portland (figura 6.8) [69].

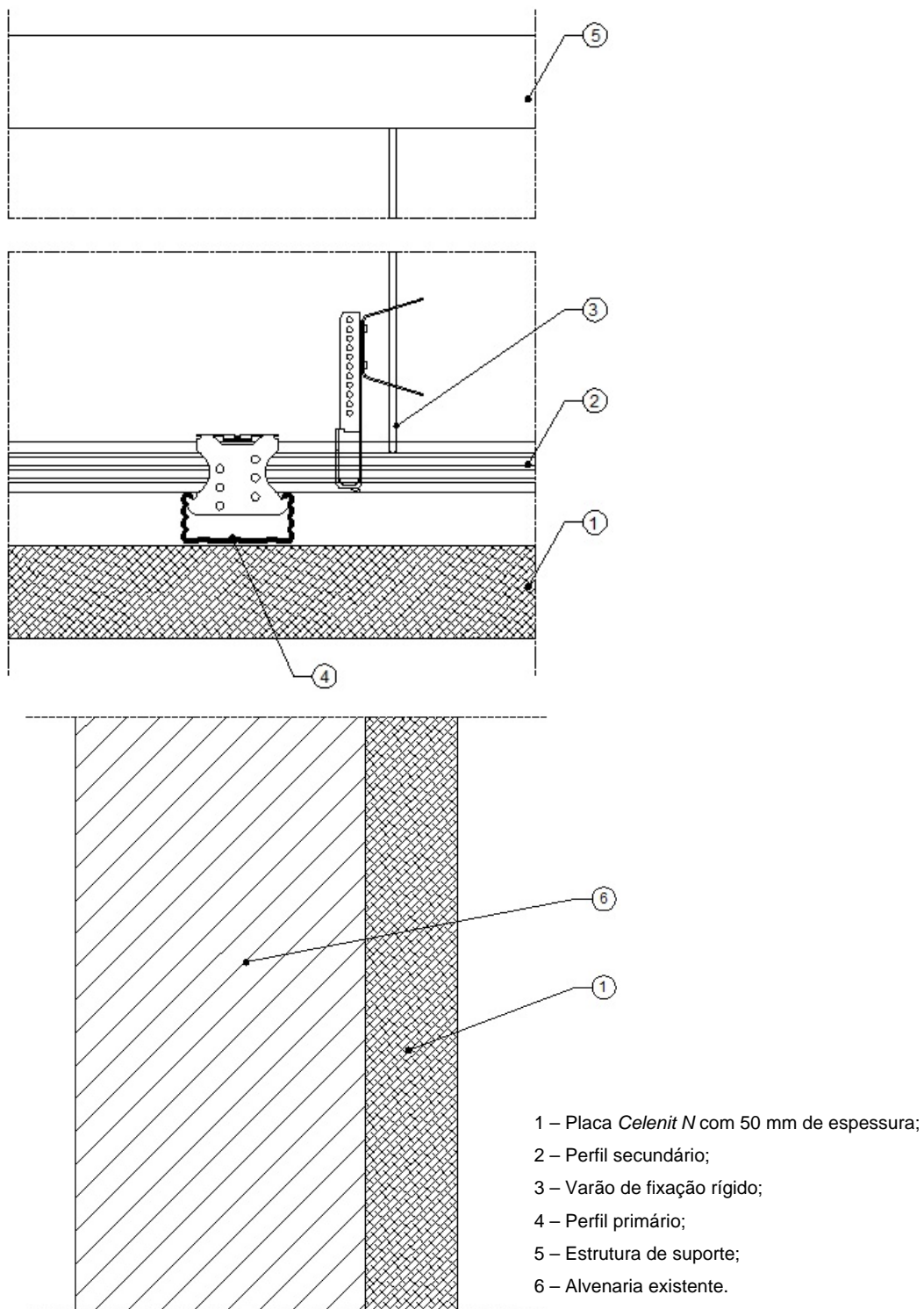


Figura 6.18 e 6.19 – Pormenor do tecto e das paredes do novo pavilhão gimno-desportivo da Escola Secundária Rodrigues de Freitas (sem escala) [65]



# 7

## MEDIÇÕES ACÚSTICAS

### 7.1. METODOLOGIA

#### 7.1.1. MÉTODO

Com vista à caracterização acústica interior das salas de aula da Escola Secundária Rodrigues de Freitas foram medidos os seguintes parâmetros:

- Isolamento sonoro a ruídos de condução aérea entre salas e sala/corredor;
- Isolamento sonoro a ruídos de percussão;
- Isolamento sonoro a ruídos de condução aérea de fachadas;
- Tempo de reverberação;
- Níveis de pressão sonora do ruído de fundo;
- Níveis de pressão sonora do ruído dos equipamentos de ventilação.

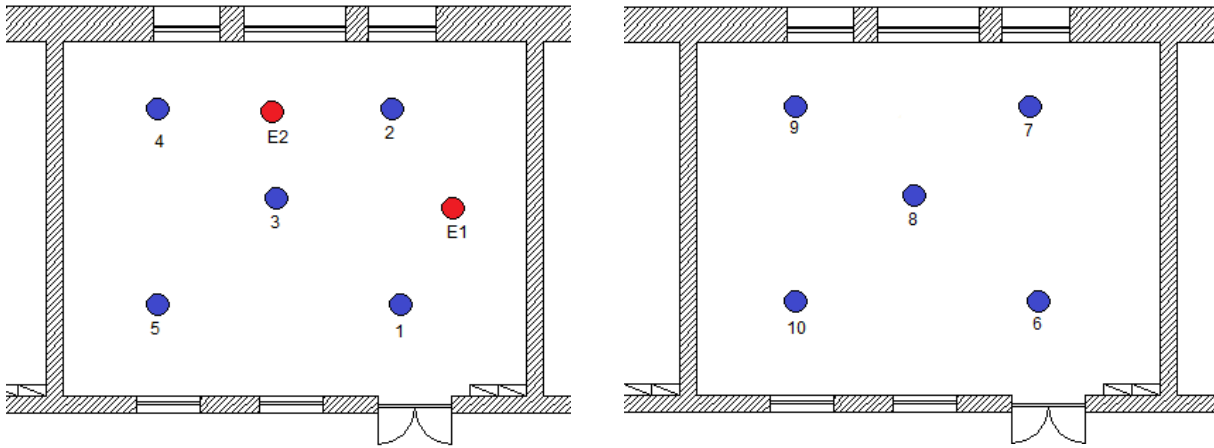
a) Isolamento sonoro a ruídos de condução aérea entre salas e sala/corredor

A medição do isolamento sonoro a ruídos de condução aérea foi realizada com base no ensaio descrito na norma NP EN ISO 140-4 [70], utilizando uma fonte sonora *Brüel & Kjaer*, modelo 4224, e um sonómetro *Brüel & Kjaer*, modelo 2260 (figura 7.1).



Figura 7.1 – Fonte sonora e sonómetro utilizados para os ensaios de isolamento sonoro a ruídos de condução aérea na Escola Secundária Rodrigues de Freitas [fotografia da autora]

A fonte sonora foi colocada em duas posições distintas na sala (E1 e E2 na figura 7.2) a cerca de 1,5 m da parede. Em cada posição da fonte sonora foram medidos, através do sonómetro, os níveis de pressão sonora por banda de frequência de 1/3 de oitava em cinco pontos do compartimento emissor (de 1 a 5) e do compartimento receptor, que situa no piso inferior (de 6 a 10) (figuras 7.2 e 7.3).



Figuras 7.2 e 7.3 – Distribuição dos pontos de emissão (E1 e E2) e de medição na sala emissora (esq.) e na sala receptora (dir.) para a determinação do isolamento sonoro a ruídos de condução aérea na Escola Secundária Rodrigues de Freitas (sem escala)

Relativamente ao isolamento sonoro a ruídos de condução aérea entre a sala e o corredor, a fonte sonora foi colocada no corredor também em duas posições (E1 e E2): à porta da sala e ao fundo da sala, conforme a figura 7.4. Tal como no ensaio anterior, também se procedeu à medição dos níveis de pressão sonora por banda de frequência de 1/3 de oitava em cinco pontos no corredor (de 1 a 5) e na sala (de 6 a 10), para cada posição da fonte sonora (figura 7.4).

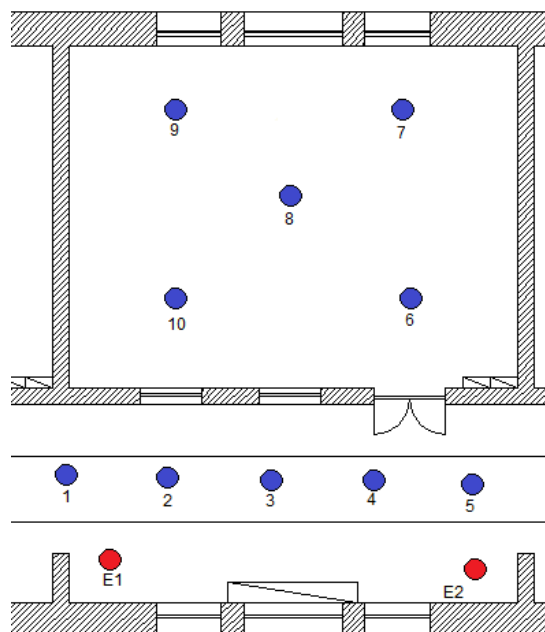


Figura 7.4 – Distribuição dos pontos de emissão (E1 e E2) e de medição no corredor e na sala de aula para a determinação do isolamento sonoro a ruídos de condução aérea na Escola Secundária Rodrigues de Freitas (sem escala)

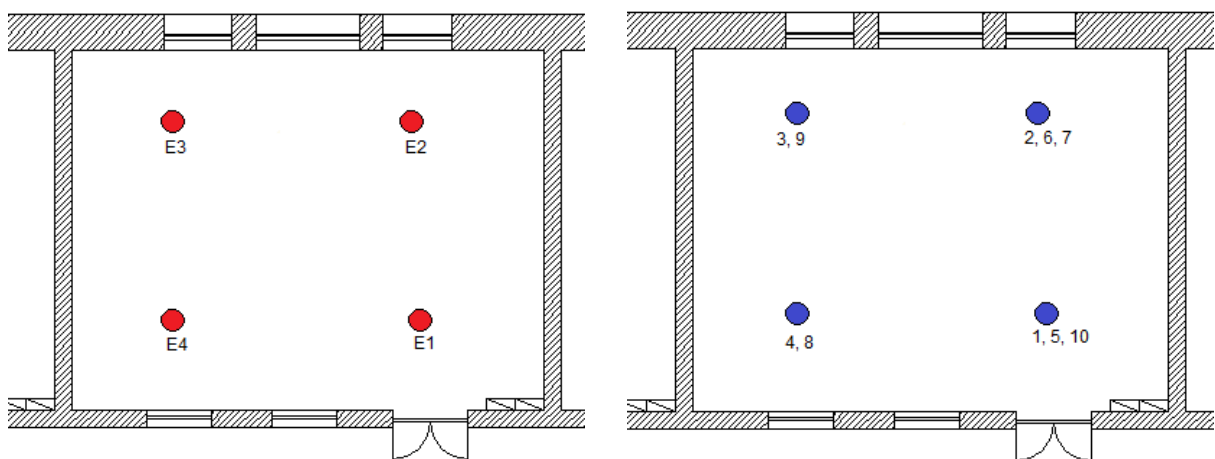
b) Isolamento sonoro a ruídos de percussão

A avaliação do isolamento de ruídos de percussão foi feita através de ensaios de pavimento sob a acção de uma percussão normalizada [71], utilizando-se uma máquina de impactos normalizada *Brüel & Kjær*, modelo 3204, (figura 7.5) e um sonómetro *Brüel & Kjær*, modelo 2260.



Figura 7.5 – Máquina de impactos normalizada [fotografia da autora]

A máquina de percussão é composta no seu interior por cinco martelos que batem no pavimento à razão de 10 choques por segundo produzindo assim uma espécie de “sapateado”. Esta foi colocada em quatro posições diferentes no compartimento emissor (E1 a E4 na figura 7.6) enquanto que na sala imediatamente abaixo foram medidos os níveis de pressão sonora. Na primeira e segunda posições foram feitas medições em seis pontos: três pontos relativos à primeira posição (de 1 a 3) e outros três relativos à segunda posição (de 4 a 6). Nas restantes posições da máquina de impactos foram feitas duas medições em cada (de 7 a 10) (figura 7.7).



Figuras 7.6 e 7.7 – Localização das diferentes posições da máquina de percussão (esq.) e dos pontos de medição na sala receptora (dir.) para a determinação do isolamento sonoro a ruídos de percussão na Escola Secundária Rodrigues de Freitas (sem escala)

c) Isolamento sonoro a ruídos de condução aérea de fachadas

Para a medição do isolamento sonoro a ruídos de condução aérea de fachadas foi novamente utilizado uma fonte sonora *Briuel & Kjaer*, modelo 4224 e um sonómetro *Briuel & Kjaer*, modelo 2260 (figura 7.8).



Figura 7.8 – Medição do isolamento sonoro a ruídos de condução aérea de fachadas na Escola Secundária Rodrigues de Freitas [fotografia da autora]

A fonte sonora foi colocada na rampa de acesso ao estacionamento da escola, virada para a fachada da sala que se pretendia caracterizar. Inicialmente procedeu-se à medição dos níveis de pressão sonora no exterior, a dois metros a fachada, e posteriormente foram medidos os níveis de pressão sonora em cinco pontos no interior da sala [72] (figura 7.9).

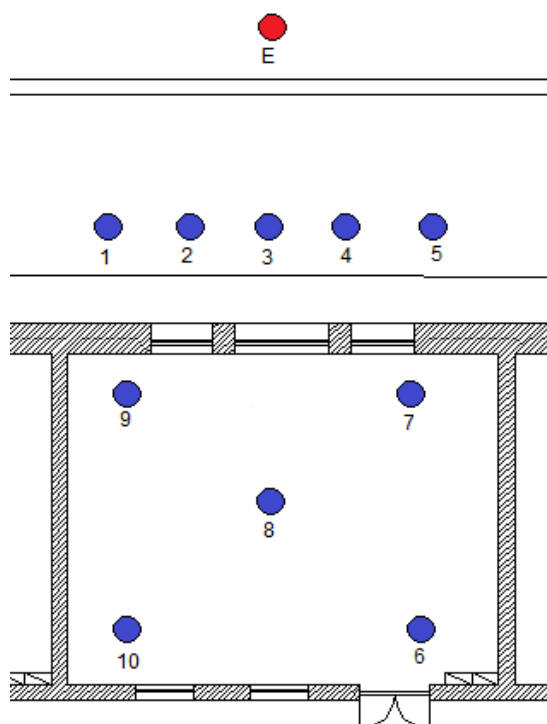


Figura 7.9 – Ponto de emissão (E) e pontos de medição para a determinação do isolamento sonoro a ruídos de condução aérea da fachada na Escola Secundária Rodrigues de Freitas (sem escala)

d) Tempo de reverberação

Para medir o tempo de reverberação utilizou-se um sonómetro *Brüel & Kjør*, modelo 2260 e uma fonte sonora *Brüel & Kjør*, modelo 4224 (figura 7.1), seguindo as recomendações da norma EN ISO 3382 [73]. Neste ensaio os dois equipamentos encontravam-se ligados entre si uma vez que o ruído emitido era interrompido por ordem do sonómetro. As salas de aula encontravam-se com as mesas e as cadeiras todas encostadas à parede exterior devido a limpezas na escola.

A fonte sonora foi colocada no local habitualmente ocupado pelo professor e emitiu um ruído durante 10 segundos. Após essa emissão, o sonómetro registou o tempo de decaimento de 20 dB e 30 dB, apresentando no final o valor extrapolado do decaimento de 60 dB.

Este parâmetro foi medido por banda de frequência de oitava em três pontos diferentes da sala (figura 7.10), tendo sido feitas duas medições em cada um desses pontos. Nas salas receptoras dos ensaios de isolamento sonoro a ruídos de condução aérea e ruídos de percussão também foi medido o tempo de reverberação por banda de frequência de 1/3 de oitava, de modo a ser possível calcular os parâmetros acústicos padronizados (expressões 2.16, 2.17 e 2.19).

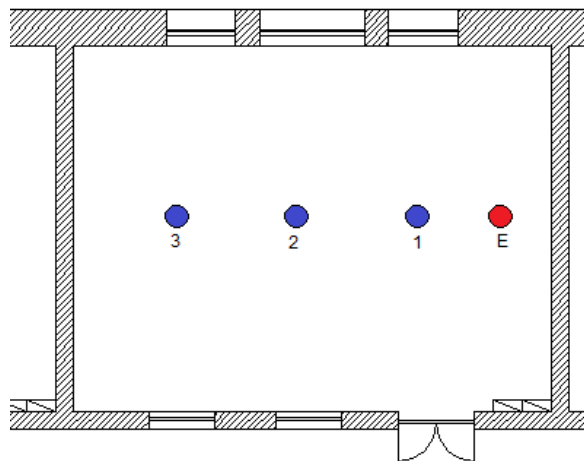


Figura 7.10 – Ponto de emissão (E) e pontos de medição para a determinação do tempo de reverberação e dos níveis de pressão sonora do ruído de fundo na Escola Secundária Rodrigues de Freitas (sem escala)

e) Ruído de fundo e de equipamentos

As medições dos níveis de pressão sonora do ruído de fundo e do ruído dos equipamentos de ventilação foram feitas utilizando um sonómetro *Brüel & Kjør*, modelo 2260. Estes ensaios foram levados a cabo em diferentes salas uma vez que no local se verificaram diferenças entre equipamentos em termos de ruído produzido.

Em cada sala as medições foram feitas em três pontos (figura 7.10) e recorreu-se ao descritor energético  $L_{eq}$ . Numa primeira parte efectuou-se o registo, em cada um dos pontos, do nível sonoro contínuo equivalente do ruído de fundo ( $L_{Aeq}$ ) e dos respectivos espectros sonoros em bandas de frequência de oitava. Em cada medição houve o cuidado de evitar eventuais picos resultantes de sirenes de veículos de emergência e de obras nos edifícios vizinhos.

Posteriormente e seguindo a norma EN ISO 16032 [74], ligou-se o equipamento de ventilação e mediu-se o ruído de novo nos três pontos acima referidos. A grelha de admissão de ar associada a estes equipamentos situa-se no topo da porta de entrada da sala de aula (figura 7.11).



Figura 7.11 – Localização da grelha de admissão de ar na sala 0.07 na Escola Secundária Rodrigues de Freitas [fotografia da autora]

### 7.1.2. EQUIPAMENTO

O equipamento utilizado na realização destas medições, disponibilizado pelo Laboratório de Acústica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (LA<sub>FEUP</sub>), foi o seguinte:

- Sonómetro *Brüel & Kjær*, modelo 2260;
- Fonte sonora *Brüel & Kjær*, modelo 4224;
- Máquina de impactos *Brüel & Kjær*, modelo 3204;
- Calibrador de microfone *Brüel & Kjær*, modelo 4231;
- Microfone de 13 mm *Brüel & Kjær*, modelo 4189;
- Tripé portátil *Brüel & Kjær*, modelo UA0049;
- Módulo estatístico *Brüel & Kjaer*, modelo BZ7210;
- Módulo estatístico *Brüel & Kjaer*, modelo BZ7204.

## 7.2. RESULTADOS

### 7.2.1. ESCOLA ANTIGA (2008)

Durante os trabalhos prévios à intervenção de reabilitação na Escola Secundária Rodrigues de Freitas, foi elaborado em 2008 um relatório pelo Laboratório de Acústica do Instituto da Construção (LAIC) [75] onde foram avaliados o isolamento sonoro a ruídos de condução aérea (quadro 7.1), o isolamento sonoro a ruídos de percussão (quadro 7.2), o isolamento sonoro a ruídos de condução aérea de fachadas (quadro 7.3) e o tempo de reverberação (quadro 7.4) de acordo com o anterior RRAE de 2002 [76].

Estes ensaios foram efectuados quer em salas então modificadas, ou seja, salas onde já tinham sido executadas algumas soluções tipo de reabilitação das lajes, tectos falsos e caixilharias duplas, quer em

salas que mantinham as soluções construtivas iniciais, designadas por “antigas”, para se testar a eficácia das possíveis soluções de reabilitação a aplicar posteriormente.

O isolamento sonoro a ruídos de condução aérea de fachadas apenas foi avaliado na sala 31, na altura uma das salas modificadas, onde tinha sido instalada uma caixilharia interior (figura 7.12) e grelhas de ventilação reguláveis. Nesta sala foram simuladas diversas situações de modo abranger todos os cenários possíveis.



Figura 7.12 – Caixilharia interior na sala 31 da Escola Secundária Rodrigues de Freitas [75]

Quadro 7.1 – Índices de isolamento sonoro a ruídos de condução aérea nas antigas salas em 2008 [75]

Elemento separador	$D_{n,w}$ medido (dB)	$D_{n,w} + I(=3)\#$ (dB)	Imposição legal (dB) [Art. 7º b)]	Cf. Art. 7º b) Dec. Lei nº 129/2002
Laje [Sala 39 Modific. x Sala 31 Modific.]#	51	54	$\geq 45$	CUMPRE
Laje [Sala 37 Antiga x Sala 29 Antiga]*	44	47	$\geq 45$	CUMPRE
Laje [Sala 31 Modific. x Sala 23 Antiga]#	37	40	$\geq 45$	NÃO CUMPRE
Parede [Corredor x Sala 31 Modific.]	20	23	$\geq 30$	NÃO CUMPRE

# - Cf. artigo 7.º 5 i); / – Incerteza; \* - Laje de betão; # - Soalho.

Quadro 7.2 – Índices de isolamento sonoro a ruídos de percussão nas antigas salas em 2008 [75]

Elemento separador	$L'_{n,w}$ medido (dB/1/3 oit.)	$L'_{n,w} - I(=3)\#$ (dB/1/3 oit.)	Imposição legal (dB) [Art. 7º c)]	Cf. Art. 7º c) Dec. Lei nº 129/2002
Laje [Sala 39 Modific. x Sala 31 Modific.]#	61	58	$\leq 65$	CUMPRE
Laje [Sala 37 Antiga x Sala 29 Antiga]*	78	75	$\leq 65$	NÃO CUMPRE
Laje [Sala 31 Modific. x Sala 23 Antiga]#	73	70	$\leq 65$	NÃO CUMPRE

# - Cf. artigo 7.º 5 ii); / – Incerteza; \* - Laje de betão; # - Soalho.

Quadro 7.3 – Índices de isolamento sonoro a ruídos de condução aérea da fachada da antiga sala 31 em 2008 [75]

Fachada	$D_{2m,n,w}$ medido (dB)	$D_{2m,n,w} + l(=3)^*$ (dB)	Imposição legal (dB)	Art. 7º - 1 a) Dec. Lei nº 129/2002
com janela interior aberta e grelha aberta #	22	25	Z. Sensível $\geq 28$ Z. Mista $\geq 33$	NÃO CUMPRE
com janela interior fechada e grelha aberta #	29	32	Idem	CUMPRE NÃO CUMPRE
com janela interior aberta e grelha fechada #	22	25	Idem	NÃO CUMPRE
com janela interior fechada e grelha fechada #	30	33	Idem	CUMPRE CUMPRE

\* Cf. artigo 7.º 5 i); l – Incerteza

# Ensaios para determinar os efeitos de uma janela dupla pelo interior e da grelha

Quadro 7.4 – Tempos de reverberação médios nas frequências de 500, 1000 e 2000 Hz nas antigas salas em 2008 [75]

LOCAL	TR médio obtido (s) [500;1000;2000] Hz	TR – l (=25%)# (s)	Volume (m <sup>3</sup> )	Imposição legal $T \leq 0,15V^{1/3}$ (s)	Art. 7º - 1 b) Dec. Lei nº 129/2002
Sala 31 – Modificada	0,9	0,7	206	0,9	CUMPRE
Sala 23 – Antiga	1,7	1,3	224	0,9	NÃO CUMPRE

# Cf. artigo 7.º 5 iv); l - Incerteza

### 7.2.2. ESCOLA REABILITADA (2010)

Após as obras de reabilitação a nomenclatura das salas de aula foi alterada (quadro 7.5).

Quadro 7.5 – Correspondência entre a nomenclatura das salas na Escola Secundária Rodrigues de Freitas antiga (2008) e a actual reabilitada (2010)

Antiga (2008)	21	23	29	31	37	39
Reabilitada (2010)	-1.06	-1.07	0.06	0.07	1.06	1.07

#### a) Isolamento sonoro a ruídos de condução aérea

A avaliação do isolamento sonoro a ruídos de condução aérea foi efectuada entre as salas 1.06 e 0.06 e entre as salas 0.06 e -1.06, obtendo-se os valores dos níveis de pressão sonora médios por bandas de frequência de 1/3 de oitava nos compartimentos emissor e receptor apresentados nos quadros 7.6 e 7.7.



No quadro 7.8 são indicados os níveis de pressão sonora médios por bandas de frequência de 1/3 de oitava obtidos no estudo do isolamento a ruídos de condução aérea entre o corredor e a sala 0.06.

Quadro 7.6 – Níveis de pressão sonora médios nas salas reabilitadas 1.06 (compartimento emissor) e 0.06 (compartimento receptor) para determinação do isolamento sonoro a ruídos de condução aérea

	Frequência (Hz)															
L (dB)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150
Emissor	85,7	90,6	90,6	87,6	87,9	88,3	90,3	92,0	92,9	88,5	86,2	86,2	86,8	88,4	89,1	83,6
Receptor	48,6	51,2	49,6	42,9	39,3	38,1	38,0	37,2	35,8	36,2	36,0	32,7	30,3	27,9	27,4	21,5

Quadro 7.7 – Níveis de pressão sonora médios nas salas reabilitadas 0.06 (compartimento emissor) e -1.06 (compartimento receptor) para determinação do isolamento sonoro a ruídos de condução aérea

	Frequência (Hz)															
L (dB)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150
Emissor	83,8	89,2	89,5	87,8	86,5	88,0	89,7	90,7	92,5	88,7	86,4	87,1	87,6	89,4	89,9	84,1
Receptor	63,0	67,7	64,8	60,4	52,3	45,5	43,6	41,6	38,4	33,9	29,6	27,8	27,0	26,4	27,0	22,9

Quadro 7.8 – Níveis de pressão sonora médios no corredor reabilitado (compartimento emissor) e na sala reabilitada 0.06 (compartimento receptor) para a determinação do isolamento sonoro a ruídos de condução aérea

	Frequência (Hz)															
L (dB)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150
Emissor	79,2	82,2	85,9	86,3	85,2	85,9	88,8	90,5	90,3	86,8	83,8	85,0	85,8	87,1	88,1	81,9
Receptor	63,2	63,0	62,7	64,0	64,6	64,1	65,3	66,4	65,9	60,1	57,0	57,7	59,5	63,1	65,6	61,3

Através da expressão 2.16 e com os valores do tempo de reverberação em bandas de frequência de 1/3 de oitava do local receptor, calculou-se o  $D_{nT}$ . Para ser possível uma comparação mais correcta com os resultados obtidos antes da reabilitação também se calculou o  $D_n$  através da seguinte expressão (utilizada pelo anterior RRAE de 2002):

$$D_n = L_1 - L_2 + 10 \log\left(\frac{A_0}{A}\right) \quad (7.1)$$

em que,

$D_n$  – isolamento sonoro a ruídos de condução aérea normalizado (dB);

$L_1$  – nível médio de pressão sonora no local emissor (dB);

$L_2$  – nível médio de pressão sonora no local receptor (dB);

$A$  – absorção sonora do local receptor ( $m^2$ );

$A_0$  – absorção sonora de referência,  $10 m^2$  (conforme o RRAE de 2002).

A absorção sonora do local receptor foi calculada usando a fórmula de Sabine (expressão 2.14) sabendo o tempo de reverberação medido *in situ*.

Os valores de  $D_{nT,w}$  e de  $D_{n,w}$  obtidos são apresentados no quadro 7.9.

Quadro 7.9 – Índices de isolamento sonoro a ruídos de condução aérea entre salas reabilitadas

Elemento separador	$D_{nT,w}$ (dB)	$D_{n,w}$ (dB)
Laje [Sala 1.06 x Sala 0.06]	57	49
Laje [Sala 0.06 x Sala -1.06]	46	38
Parede [Corredor x Sala 0.06]	27	19

b) Isolamento sonoro a ruídos de percussão

Tal como o isolamento sonoro a ruídos de condução aérea, a medição do isolamento sonoro a ruídos de percussão também foi levada a cabo entre as salas 1.06 e 0.06 e entre as salas 0.06 e -1.06.

O quadro 7.10 indica os níveis de pressão sonora médios por banda de frequência de 1/3 de oitava registados nos compartimentos receptores.

Quadro 7.10 – Níveis de pressão sonora médios na sala reabilitada 0.06 e na -1.06 para a determinação do isolamento sonoro a ruídos de percussão

	Frequência (Hz)															
$L_{receptor}$ (dB)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150
Sala 0.06	55,2	55,7	59,0	58,0	56,5	58,5	58,3	59,2	59,2	61,9	64,9	60,1	53,9	48,1	43,5	37,3
Sala -1.06	66,2	69,5	71,6	71,4	67,2	65,1	60,1	56,1	56,1	55,2	54,3	49,6	47,2	43,5	38,2	34,2

O cálculo do parâmetro  $L'_{nT}$  foi feito através da expressão 2.19 enquanto que o parâmetro  $L'_n$  foi calculado segundo a expressão 7.2 (utilizada pelo anterior RRAE de 2002).

$$L'_n = L_i - 10 \log \left( \frac{A}{A_0} \right) \quad (7.2)$$

em que,

$L'_n$  – a falta de isolamento sonoro a ruídos de percussão normalizado (dB);

$L_i$  – nível médio de pressão sonora no local receptor (dB);

$A$  – absorção sonora do local receptor ( $m^2$ );

$A_0$  – absorção sonora de referência,  $10 m^2$  (conforme RRAE de 2002).

No quadro 7.11 encontram-se os valores de  $L'_{nT,w}$  e  $L'_{n,w}$ .

Quadro 7.11 – Índices de isolamento sonoro a ruídos de percussão entre salas reabilitadas

Elemento separador	$L'_{nT,w}$ (dB)	$L'_{n,w}$ (dB)
Laje [Sala 1.06 x Sala 0.06]	56	64
Laje [Sala 0.06 x Sala -1.06]	60	69

c) Isolamento sonoro a ruídos de condução aérea de fachadas

O isolamento sonoro a ruídos de condução aérea de fachadas apenas foi avaliado na sala 0.06. Os valores dos níveis de pressão sonora médios por banda de 1/3 de oitava registados no exterior e no interior da sala são apresentados no quadro 7.12.

Quadro 7.12 – Níveis de pressão sonora médios no exterior da sala reabilitada 0.06 e no interior para a determinação do isolamento sonoro a ruídos de condução aérea de fachadas

L (dB)	Frequência (Hz)															
	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150
Exterior	74,3	77,7	78,9	74,9	76,4	77,2	78,9	83,9	86,4	82,6	77,5	76,5	78,2	81,8	84,2	76,2
Sala 0.06	52,1	56,8	57,8	51,0	52,9	52,3	53,5	54,8	57,0	49,6	43,9	46,5	47,6	53,1	57,7	52,9

Com os valores médios da pressão sonora no local emissor e no local receptor e o tempo de reverberação aí medido por 1/3 de oitava, foi possível calcular  $D_{2m,nT}$ . O cálculo do parâmetro  $D_{2m,n}$  foi feito através da expressão 7.3 (utilizada pelo anterior RRAE de 2002).

$$D_{2m,n} = L_{1,2m} - L_2 + 10 \log\left(\frac{A_0}{A}\right) \quad (7.3)$$

em que,

$D_{2m,n}$  – isolamento sonoro a ruído de condução aérea de paredes exteriores normalizado (dB);

$L_{1,2m}$  – nível médio de pressão sonora no exterior a 2 m da fachada (dB);

$L_2$  – nível médio de pressão sonora no local receptor (dB);

$A$  – absorção sonora do local receptor ( $m^2$ );

$A_0$  – absorção sonora de referência,  $10 m^2$  (conforme RRAE de 2002).

Seguindo o método descrito no capítulo 2 obtiveram-se os valores dos parâmetros  $D_{2m,nT,w}$  e  $D_{2m,n,w}$  indicados no quadro 7.13

Quadro 7.13 – Índices de isolamento sonoro a ruídos de condução aérea da fachada da sala reabilitada 0.06

Elemento separador	$D_{2m,nT,w}$ (dB)	$D_{2m,n,w}$ (dB)
Fachada sala 0.06	31	23

d) Tempo de reverberação

A medição do tempo de reverberação foi efectuada nas salas -1.07, -1.06, 0.06 e 1.06. Nos quadros 7.14 a 7.17 estão presentes os valores do tempo de reverberação por banda de frequência de oitava registados em cada um dos pontos, o valor médio por frequência e o tempo de reverberação médio nas frequências de 500, 1000, e 2000 Hz.

Quadro 7.14 – Tempo de reverberação na sala reabilitada -1.07 da Escola Secundária Rodrigues de Freitas

Pontos	Frequência (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
1	0,71	0,63	0,74	1,04	1,05	0,95
2	0,71	0,58	0,81	1,07	1,06	0,93
3	0,78	0,56	0,79	1,07	0,99	0,93
TR médio (s)	0,73	0,59	0,78	1,06	1,03	0,94
TR médio 500, 1000, 2000 (s)	0,96					

Quadro 7.15 – Tempo de reverberação na sala reabilitada -1.06 da Escola Secundária Rodrigues de Freitas

Pontos	Frequência (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
1	0,63	0,72	0,78	0,99	0,97	0,90
2	0,58	0,73	0,82	1,14	0,99	0,93
3	0,64	0,68	0,82	1,11	1,01	0,91
TR médio (s)	0,62	0,71	0,81	1,08	0,99	0,91
TR médio 500, 1000, 2000 (s)	0,96					

Quadro 7.16 – Tempo de reverberação na sala reabilitada 0.06 da Escola Secundária Rodrigues de Freitas

Pontos	Frequência (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
1	0,73	0,85	0,78	0,88	0,94	0,84
2	0,63	0,75	0,80	0,92	0,96	0,84
3	0,71	0,75	0,75	0,93	0,94	0,83
TR médio (s)	0,69	0,78	0,78	0,91	0,95	0,84
TR médio 500, 1000, 2000 (s)	0,88					

Quadro 7.17 – Tempo de reverberação na sala reabilitada 1.06 da Escola Secundária Rodrigues de Freitas

Pontos	Frequência (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
1	0,73	0,68	0,83	1,01	1,08	0,95
2	0,88	0,67	0,83	1,07	1,08	0,98
3	0,83	0,72	0,82	1,07	1,11	1,00
TR médio (s)	0,81	0,69	0,83	1,05	1,09	0,98
TR médio 500, 1000, 2000 (s)	0,99					

e) Ruído de fundo e de equipamentos

Os ensaios de medição dos níveis de pressão sonora do ruído de fundo e do ruído dos equipamentos de ventilação foram efectuados nas salas -1.06, 0.06, 0.07 e 1.06. Os valores registados dos níveis de pressão sonora médios por banda de frequência de oitava em cada ponto e os valores globais são apresentados nos quadros 7.18 e 7.19.

Quadro 7.18 – Níveis de pressão sonora médios do ruído de fundo com o equipamento de ventilação ligado nas salas reabilitadas (2010)

L médio (dB)	Frequência (Hz)									Global
	31	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Sala -1.06	47,9	47,5	42,9	34,1	25,0	22,8	22,0	20,3	15,6	51,5
Sala 0.06	47,3	50,2	54,4	34,8	26,3	21,8	20,7	19,6	16,0	56,4
Sala 0.07	45,1	49,0	45,3	30,8	25,2	22,6	20,6	17,9	14,9	51,7
Sala 1.06	44,0	48,7	48,5	36,6	25,8	22,9	19,9	14,5	13,3	52,4

Quadro 7.19 – Níveis de pressão sonora do ruído de fundo médio com o equipamento de ventilação desligado nas salas reabilitadas (2010)

L médio (dB)	Frequência (Hz)									Global
	31	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Sala -1.06	45,4	45,6	39,0	29,4	23,3	20,8	16,7	13,3	12,4	49,0
Sala 0.06	44,7	43,0	38,4	29,9	24,3	21,3	18,1	14,5	13,2	47,6
Sala 0.07	41,7	42,6	31,2	23,5	20,4	18,0	16,2	13,1	12,3	45,4
Sala 1.06	42,1	44,2	39,7	28,9	23,8	21,3	18,8	12,7	12,6	47,3

Corrigindo os valores médios calculados dos níveis de pressão sonora com o filtro A para o ouvido humano obtêm-se os valores dos níveis sonoros apresentados nos quadros 7.20 e 7.21.

Quadro 7.20 – Níveis sonoros médios do ruído de fundo com o equipamento de ventilação ligado nas salas reabilitadas (2010)

L <sub>A</sub> (dB)	Frequência (Hz)									Global
	31	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Sala -1.06	7,9	21,5	27,4	25,6	22,0	22,8	23,0	21,3	14,6	32,5
Sala 0.06	7,3	24,2	38,9	26,3	23,3	21,8	21,7	20,6	15,0	39,6
Sala 0.07	5,1	23,0	29,8	22,3	22,2	22,6	21,6	18,9	13,9	32,8
Sala 1.06	4,0	22,7	33,0	28,1	22,8	22,9	20,9	15,5	12,3	35,3

Quadro 7.21 – Níveis sonoros médios do ruído de fundo com o equipamento de ventilação desligado nas salas reabilitadas (2010)

L <sub>A</sub> (dB)	Frequência (Hz)									Global
	31	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Sala -1.06	5,4	19,6	23,5	20,9	20,3	20,8	17,7	14,3	11,4	28,9
Sala 0.06	4,7	17,0	22,9	21,4	21,3	21,3	19,1	15,5	12,2	29,0
Sala 0.07	1,7	16,6	15,7	15,0	17,4	18,0	17,2	14,1	11,3	25,1
Sala 1.06	2,1	18,2	24,2	20,4	20,8	21,3	19,8	13,7	11,6	29,2

Para verificar o cumprimento da legislação em vigor calculou-se o nível de avaliação do ruído particular do equipamento através da expressão 7.4, estando os valores apresentados no quadro 7.22.

$$L_{Ar,nT} = L_{Aeq} - K_{tonal} - 10 \log \left( \frac{T}{T_0} \right) \quad (7.4)$$

em que,

L<sub>Ar,nT</sub> – nível de avaliação do ruído particular de equipamentos padronizado (dB);

L<sub>Aeq</sub> – nível sonoro contínuo equivalente do equipamento (dB);

K<sub>tonal</sub> – constante numérica;

T – tempo de reverberação do local receptor (s);

T<sub>0</sub> – tempo de reverberação de referência, 0,5 s.

A constante K<sub>tonal</sub> refere-se à penalização devido à tonalidade do ruído e assume o valor de 3 dB(A) sempre que pelo menos uma banda de frequência de 1/3 de oitava for superior em 5 dB em relação às duas bandas adjacentes, na gama do 50 aos 8000 Hz e avaliado com o filtro A. Neste cálculo, o valor de K<sub>tonal</sub> foi sempre 0 dB(A).

Quadro 7.22 – Níveis de avaliação do ruído particular de equipamentos padronizados nas salas reabilitadas da Escola Secundária Rodrigues de Freitas

$L_{A,r,nT}$ (dB)	Frequência (Hz)								Global
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Sala -1.06	11,0	24,2	22,4	15,1	15,3	18,5	17,7	9,9	28,2
Sala 0.06	20,7	37,4	22,8	17	9,2	15,5	16,7	10,3	37,7
Sala 1.06	14,6	30,2	25,9	16,1	14,6	10,8	7,9	2,2	31,9

### 7.3. DISCUSSÃO DE RESULTADOS

#### 7.3.1. ISOLAMENTO SONORO

Tal como referido anteriormente, com os níveis de pressão sonora obtidos quer na medição do isolamento sonoro a ruídos de condução aérea quer na medição do isolamento sonoro a ruídos de percussão calcularam-se os parâmetros  $D_{nT,w}$  e  $L_{nT,w}$ , respectivamente. No entanto, é importante analisar os valores de ambos os isolamentos sonoros padronizados por banda de 1/3 de oitava.

##### a) Isolamento sonoro a ruídos de condução aérea

Na figura 7.13 estão representados os valores do isolamento sonoro a ruídos de condução aérea padronizado por bandas de frequência de 1/3 de oitava nas três situações estudadas.

Observando a figura 7.13 verifica-se que o isolamento sonoro da parede entre o corredor e a sala 0.06 não tem grandes diferenças entre bandas de frequência e, comparativamente com as outras duas medições (lajes), não atinge valores muito elevados. Isto possivelmente deve-se ao facto da existência de frinchas de alguma dimensão na porta de entrada da sala uma vez que, ao contrário do que estava previsto no projecto, não foram aplicadas borrachas de vedação nas portas. Também é mais difícil garantir um bom isolamento sonoro da parede de separação entre a sala e o corredor pelo facto de esta ser maioritariamente constituída por vidro (figura 7.14) e este ser um dos materiais de construção com menor redução sonora (figura 7.15).

O isolamento sonoro das lajes entre as salas 1.06 e 0.06 e as salas 0.06 e -1.06 não é igual mas tem uma tendência semelhante nas altas frequências. No entanto, verifica-se uma maior diferença nas baixas frequências uma vez que as lajes têm soluções construtivas diferentes: a laje de tecto do piso 0 (1.06/0.06) é em betão armado ao contrário da laje de tecto do piso -1 (0.06/1.06) composta por um vigamento de madeira. Apesar de ambas as salas terem tectos falsos compostos por placas de gesso cartonado perfurado com um véu negro e placas de lã de rocha de 40 mm de espessura, a maior massa da laje de betão do piso 1 permite obter um maior isolamento por frequência enquanto que com a solução adoptada para a laje do piso 0, composta por placas de lã de rocha de 100 mm de espessura e placas de gesso cartonado liso, o isolamento sonoro nas baixas frequências é menor.

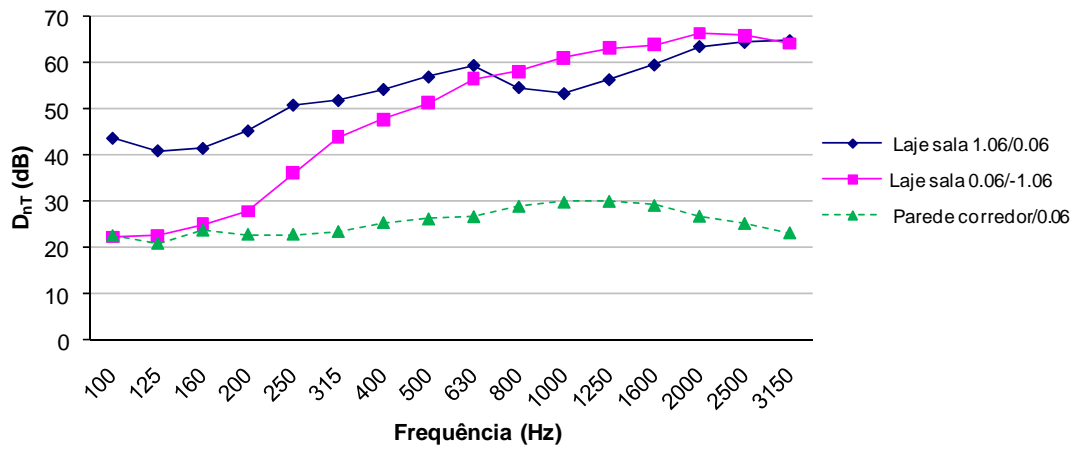


Figura 7.13 – Valores de  $D_{nT}$  por bandas de frequência de 1/3 oitava entre salas reabilitadas da Escola Secundária Rodrigues de Freitas



Figura 7.14 – Corredor de acesso às salas de aula da Escola Secundária Rodrigues de Freitas [fotografia da autora]



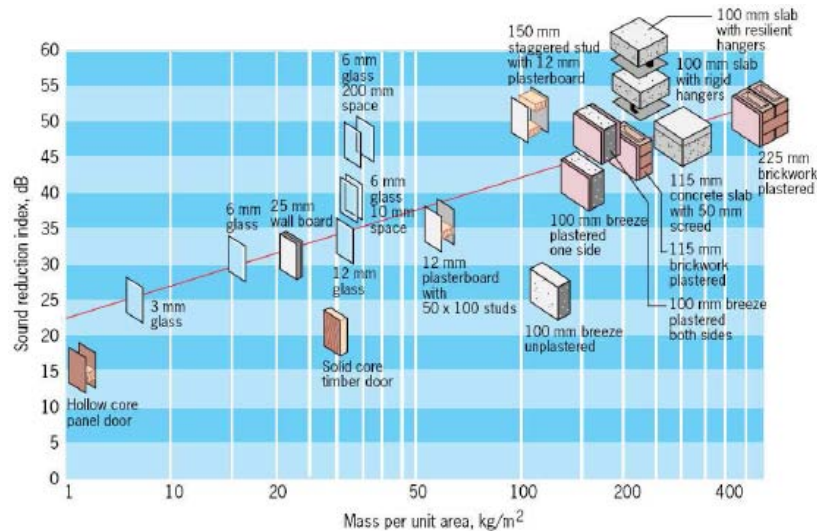


Figura 7.15 – Índice de redução sonora ( $R_w$ ) de diferentes elementos de construção [5]

b) Isolamento sonoro a ruídos de percussão

No gráfico da figura 7.16 apresentam-se os valores do isolamento sonoro a ruídos de percussão padronizado por bandas de frequência de 1/3 de oitava nas duas situações estudadas.

Através da figura 7.16 é possível verificar que entre a sala 0.06 e a sala -1.06 o isolamento sonoro aos ruídos de percussão é reduzido nas baixas frequências. Como  $L'_{nT}$  depende do nível de pressão sonora no compartimento receptor (expressão 2.17), quanto maior for o valor de  $L_i$ , maior é  $L'_{nT}$ , o que significa menor isolamento.

Tal como foi mencionado anteriormente, as duas lajes solicitadas neste ensaio têm disposições construtivas distintas mas em ambas foi feita a cobertura da superfície radiante através da implementação de um tecto falso absorvente. Mesmo tendo sido incluído um suporte antivibrático na ligação do tecto falso ao vigamento de madeira entre o piso 0 e o piso -1 (figura 6.14), esta laje tem uma maior diferença, entre bandas de frequência, do isolamento sonoro a ruídos de percussão. A ligação das vigas de madeira à parede de alvenaria de granito possivelmente é mais rígida que a ligação da laje de betão, o que origina esta diferença entre pisos.

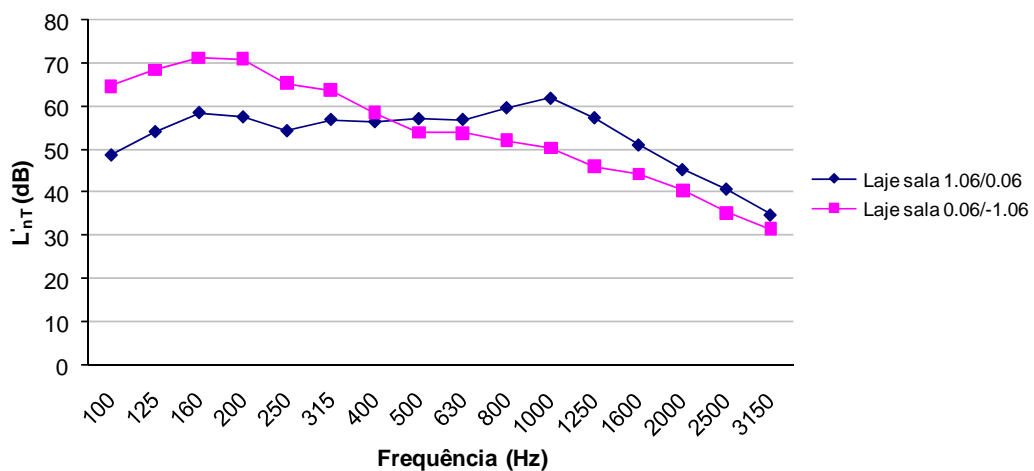


Figura 7.16 – Valores de  $L'_{nT}$  por bandas de frequência de 1/3 de oitava em duas lajes de salas reabilitadas da Escola Secundária Rodrigues de Freitas

No quadro 7.23 apresenta-se a comparação dos valores dos índices de isolamento sonoro a ruídos de condução aérea normalizados agora medidos (2010) e os existentes no relatório produzido pelo LAIC (2008).

Quadro 7.23 – Comparação dos valores de  $D_{n,w}$  medidos em 2010 e 2008

Elemento separador	$D_{n,w}$ medido (2010) (dB)	$D_{n,w}$ medido (2008) (dB)
Laje [Sala 1.06 x Sala 0.06]	49	44
Laje [Sala 0.06 x Sala -1.06]	38	37
Parede [Corredor x Sala 0.06]	19	20

Analisando o quadro 7.23 verifica-se que há um aumento do isolamento sonoro entre as salas 1.06 e 0.06 (antigas 37 e 29) resultante da reabilitação.

A medição do isolamento sonoro entre as salas do piso 0 e do piso -1 na altura da reabilitação foi feita entre uma sala com modificações e uma por reabilitar. O valor agora calculado já diz respeito a duas salas totalmente reabilitadas, no entanto a diferença não é muito significativa.

O isolamento sonoro entre o corredor e a sala de aula não foi medido na mesma sala que no relatório de 2008, no entanto é possível observar que o resultado de  $D_{n,w}$  desta nova sala é semelhante ao do primeiro relatório uma vez que todas as salas foram sujeitas ao mesmo tipo de reabilitação acústica. A diferença que existe pode dever-se às frinchas que existem nas portas de entrada das salas de aula.

No quadro 7.24 apresenta-se uma comparação dos valores dos índices de isolamento sonoro a ruídos de percussão normalizados agora medidos (2010) e os existentes no relatório elaborado pelo LAIC (2008).

Quadro 7.24 – Comparação dos valores de  $L'_{n,w}$  medidos em 2010 e 2008

Elemento separador	$L'_{n,w}$ medido (2010) (dB)	$L'_{n,w}$ medido (2008) (dB)
Laje [Sala 1.06 x Sala 0.06]	64	78
Laje [Sala 0.06 x Sala -1.06]	69	73

Tal como apresentado no quadro 7.24, a diferença entre os valores agora medidos e os medidos em 2008 é muito significativa. Esta diferença é especialmente acentuada quando se compara o valor obtido entre as salas do piso 1 e piso 0 uma vez que o valor de  $L'_{n,w}$  de 78 dB diz respeito a duas salas antigas enquanto que os 73 dB foram obtidos entre uma sala modificada e uma antiga.

Os valores de  $D_{n,w}$  e  $L'_{n,w}$  obtidos são muito diferentes dos previstos no Projecto de Execução de Condicionamento Acústico. O isolamento sonoro dos elementos separadores é inferior ao dimensionado, especialmente entre o piso 0 e o piso -1, o que poderá ser indicador de alguma falha na execução da solução construtiva proposta.

Comparando os valores dos parâmetros  $D_{nT,w}$  e  $L'_{nT,w}$  com os limites estabelecidos pelo RRAE verifica-se que todos os limites são cumpridos (quadros 7.25 e 7.26). No caso do isolamento sonoro a ruídos de condução aérea entre o corredor e sala de aula, o limite imposto pelo RRAE apenas é

cumprido com a adição da Incerteza, o que indica que o limite regulamentar poderá, em algumas situações, ser excedido.

Quadro 7.25 – Verificação da conformidade dos valores de  $D_{nT,w}$  com os limites do actual RRAE

Elemento separador	$D_{nT,w}$ (dB)	$D_{nT,w} + I$ (dB)	Imposição legal (dB) [Art. 7º - 1b)]	Art. 7º - 1b) Dec. Lei nº 96/2008
Laje [Sala 1.06 x Sala 0.06]	57	60	$\geq 45$	CUMPRE
Laje [Sala 0.06 x Sala -1.06]	46	49	$\geq 45$	CUMPRE
Parede [Corredor x Sala 0.06]	27	30	$\geq 30$	CUMPRE

I=3 dB (Incerteza)

Quadro 7.26 – Verificação de conformidade dos valores de  $L'_{nT,w}$  com os limites do actual RRAE

Elemento separador	$L'_{nT,w}$ (dB)	$L'_{n,w} + I$ (dB)	Imposição legal (dB) [Art. 7º - 1c)]	Art. 7º - 1c) Dec. Lei nº 96/2008
Laje [Sala 1.06 x Sala 0.06]	56	53	$\leq 65$	CUMPRE
Laje [Sala 0.06 x Sala -1.06]	60	57	$\leq 65$	CUMPRE

I=-3 dB (Incerteza)

### c) Isolamento sonoro a ruídos de condução aérea de fachadas

Na figura 7.17 são apresentados os valores do isolamento sonoro a ruídos de condução aérea padronizado da fachada da sala 0.06 por banda de frequência de 1/3 de oitava.

O isolamento sonoro da parede exterior é muito inferior ao alcançado nas lajes, assumindo valores entre os 21 dB e os 37 dB, sendo maior nas altas frequências do que nas baixas. Estes valores são condicionados pelo facto de haver uma grande área envidraçada e os caixilhos serem todos em madeira (figura 7.18). Comparando com o isolamento sonoro da parede de separação do corredor com a sala, verifica-se que a fachada da sala possui um maior isolamento sonoro por banda de frequência.

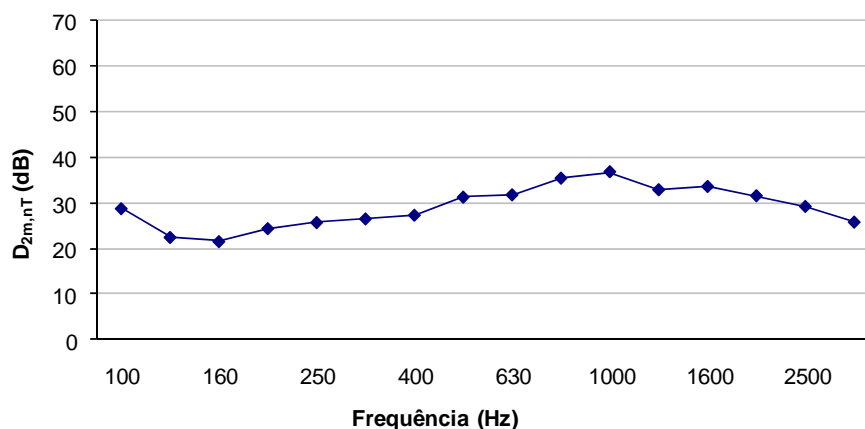


Figura 7.17 – Valores de  $D_{2m,nT}$  por banda de frequência de 1/3 de oitava na sala 0.06 reabilitada da Escola Secundária Rodrigues de Freitas



Figura 7.18 – Fachada da Escola Secundária Rodrigues de Freitas [fotografia da autora]

A fachada, ao contrário do que inicialmente tinha sido previsto no projecto de condicionamento acústico e posteriormente testado (2008), apenas possui janela simples e três grelhas de ventilação fixas que se encontram por baixo das três janelas que constituem a fachada, por trás dos radiadores de aquecimento (figura 7.18). Deste modo a comparação com os resultados do relatório do LAIC (2008) apenas pode ser feita para o caso da janela interior aberta com grelha aberta, tal como indicado no quadro 7.27.

Quadro 7.27 – Comparação dos valores de  $D_{2m,n,w}$  medidos em 2010 e 2008

Elemento separador	$D_{2m,n,w}$ medido (2010) (dB)	$D_{2m,n,w}$ medido (2008) (dB)
Fachada sala 0.06	23	22

O resultado relativo ao relatório do LAIC (2008) já diz respeito a uma sala “modificada” (sala tipo). Como tal, o que se constata é que na nova sala analisada no âmbito deste trabalho (2010) alcançou-se um valor semelhante para o parâmetro  $D_{2m,n,w}$ .

Observando o quadro 7.28 verifica-se que há o cumprimento dos limites definidos pelo RRAE. Nesta situação é possível constatar que a mudança do cálculo de parâmetros normalizados para padronizados permite alcançar mais facilmente os limites regulamentares. O parâmetro  $D_{2m,n,w}$  calculado em 2008, segundo o RRAE de 2002, no caso de janela interior aberta com grelha de ventilação aberta não cumpria os limites regulamentares (quadro 7.3).

Com o novo RRAE, o parâmetro  $D_{2m,nT,w}$  no mesmo caso já cumpre os limites. Nas zonas sensíveis, zona vocacionada para uso habitacional, escolas, hospitais e pequenas unidades de comércio e de serviços sem funcionamento no período nocturno, essa verificação é feita sem a adição da Incerteza. Nas zonas mistas o limite é apenas alcançado com o factor I. Este facto é preocupante já que no

Projecto de Condicionamento Acústico está referido que, por recomendação do Dono de Obra, a zona onde se encontra implantado o edifício é considerada uma zona mista. Esta situação pode ser ainda mais gravosa nas salas situadas no piso -1 uma vez que estas estão viradas para o parque de estacionamento dos docentes. Com base no quadro 7.3, é legítimo considerar a janela dupla como um elemento importante para a obtenção de valores regulamentares.

Quadro 7.28 – Verificação da conformidade dos valores de  $D_{2m,nT,w}$  com os limites do actual RRAE

Elemento separador	$D_{2m,nT,w}$ (dB)	$D_{2m,nT,w} + I$ (dB)	Imposição legal (dB) [Art. 7º - 1a)]	Art. 7º - 1a) Dec. Lei nº 96/2008
Fachada sala 0.06	31	34	Z. Sensível $\geq 28$ Z. Mista $\geq 33$	CUMPRE

$I=3$  dB (Incerteza)

### 7.3.2. TEMPO DE REVERBERAÇÃO

Nas figuras 7.19 a 7.22 apresentam-se os valores do tempo de reverberação por banda de frequência de oitava em cada um dos pontos testados nas salas -1.07, -1.06, 0.06 e 1.06. Na figura 7.23 estão representados os tempos de reverberação médios por banda de frequência nas salas referidas.

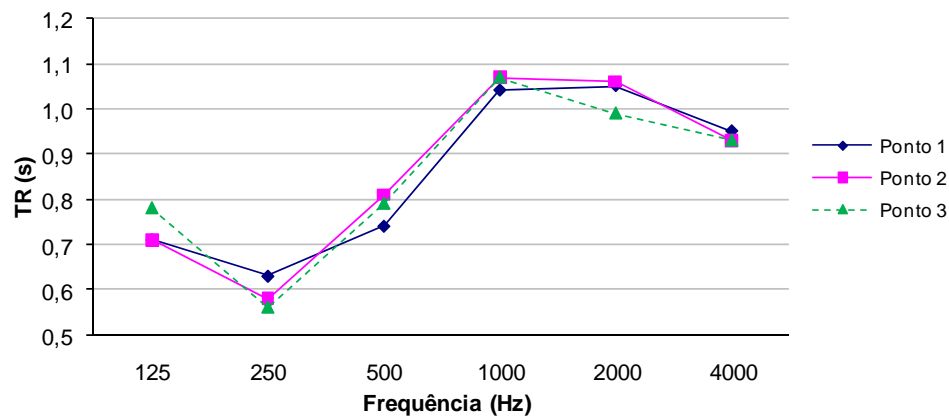


Figura 7.19 – Tempo de reverberação por banda de frequência na sala reabilitada -1.07 da Escola Secundária Rodrigues de Freitas

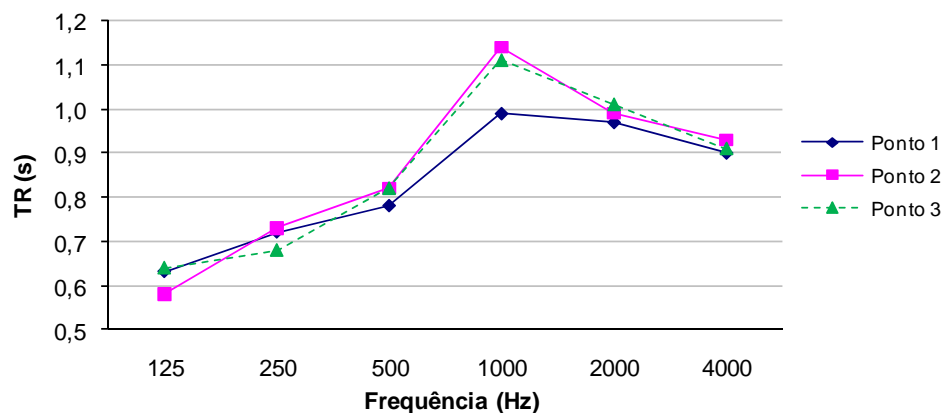


Figura 7.20 – Tempo de reverberação por banda de frequência na sala reabilitada -1.06 da Escola Secundária Rodrigues de Freitas

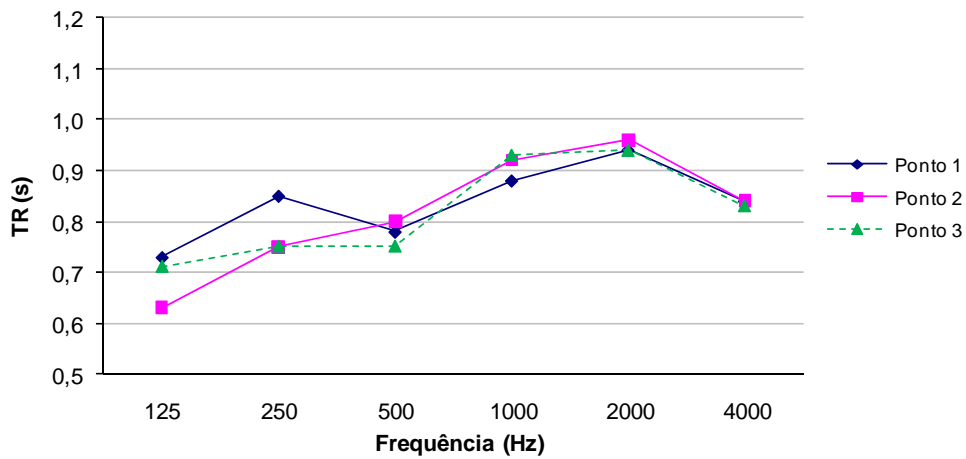


Figura 7.21 – Tempo de reverberação por banda de frequência na sala reabilitada 0.06 da Escola Secundária Rodrigues de Freitas

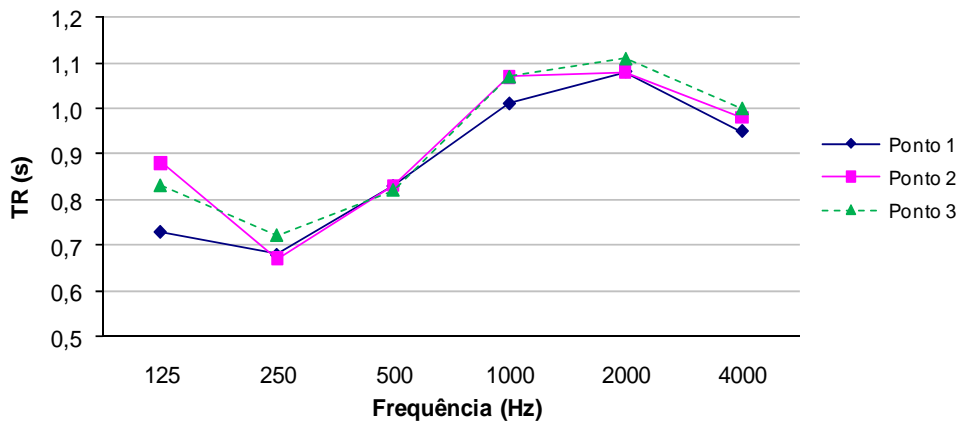


Figura 7.22 – Tempo de reverberação por banda de frequência na sala reabilitada 1.06 da Escola Secundária Rodrigues de Freitas

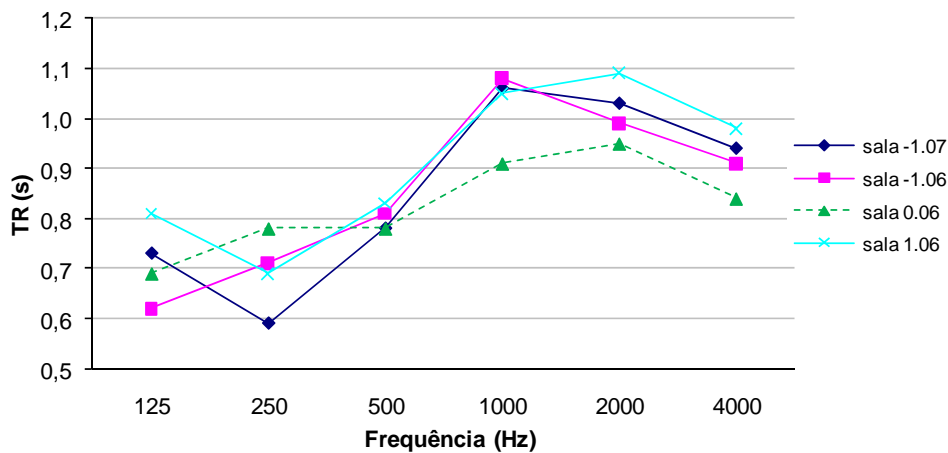


Figura 7.23 – Tempo de reverberação médio por banda de frequência nas salas reabilitadas da Escola Secundária Rodrigues de Freitas

O tempo de reverberação, tal com é mencionado no capítulo 3, tem uma forte influência no correcto funcionamento das aulas. Para haver uma boa percepção da palavra, considera-se que o tempo de reverberação ideal deve ser baixo, entre 0,6 e 0,8 s (nos 500 e 1000 Hz) e nunca superior a 0,9 s, tal como indicado na figura 2.6 e referido no capítulo 3.

Os valores registados do tempo de reverberação nos 500 Hz situam-se dentro do intervalo ideal enquanto que nos 1000 Hz atingem valores um pouco superiores. Como se tratam de salas com a mesma volumetria e com tratamentos acústicos semelhantes (tectos falsos absorventes compostos por placas de gesso cartonado perfurado com uma caixa-de-ar parcialmente preenchida com placas de lã de rocha com 40 kg/m<sup>3</sup> de densidade), de um modo geral os tempos de reverberação seguem a mesma tendência, excepto na sala 0.06 que tem uma menor diferença entre os tempos de reverberação por bandas de frequência. Nas restantes salas, registam-se grandes diferenças principalmente entre as frequências de 500 e 1000 Hz (36 % de diferença na sala -1.07). As medições dos tempos de reverberação deveriam ter sido feitas com as cadeiras e as mesas devidamente colocadas por toda a sala para haver a correcta absorção sonora dos elementos.

No quadro 7.29 é feita a comparação do valor do tempo de reverberação médio obtido na sala reabilitada -1.07 e o referido no relatório do LAIC (2008). A melhoria é assinalável o que demonstra a eficácia do tratamento acústico a que a sala foi sujeita.

O cumprimento do RRAE também é alcançado apesar de na maioria das salas estudadas apenas com a adição da Incerteza (I) prevista no RRAE (quadro 7.30). Este facto é bastante significativo pois indica que as salas poderão exceder os limites regulamentares do tempo de reverberação em algumas situações.

Quadro 7.29 – Comparação dos valores de TR médios obtidos em 2010 e 2008

Local	TR médio (2010) (s)	TR médio (2008) (s)
	[500;1000;2000] Hz	[500;1000;2000] Hz
Sala -1.07	1,0	1,7

Quadro 7.30 – Verificação da conformidade dos valores de TR com os limites do actual RRAE

Local	Volume	TR médio (s)	Imposição legal	TR + I	Art. 7º - 1d)
	(m <sup>3</sup> )	[500;1000;2000] Hz	$TR \leq 0,15V^{1/3}$ (s)	(s)	Dec. Lei nº 96/2008
Sala -1.07	200	1,0	0,9	0,7	CUMPRE
Sala -1.06	200	1,0	0,9	0,7	CUMPRE
Sala 0.06	208	0,9	0,9	0,7	CUMPRE
Sala 1.06	207	1,0	0,9	0,8	CUMPRE

I=-25% do valor regulamentar (Incerteza)

### 7.3.3. RUÍDO DE FUNDO E RUÍDO DE EQUIPAMENTOS

No caso do ruído de fundo importa analisar os resultados corrigidos com o filtro A, apresentando-se assim os valores medidos dos níveis sonoros do ruído de fundo por banda de frequência de oitava em cada sala com o equipamento de ventilação ligado e desligado (figuras 7.24 e 7.25).

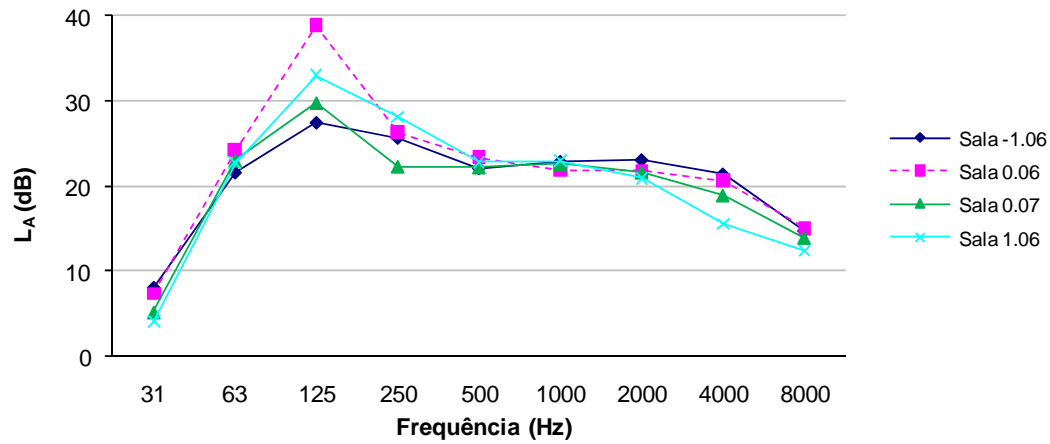


Figura 7.24 –  $L_A$  médios do ruído de fundo por banda de frequência com o equipamento de ventilação ligado nas salas rehabilitadas da Escola Secundária Rodrigues de Freitas

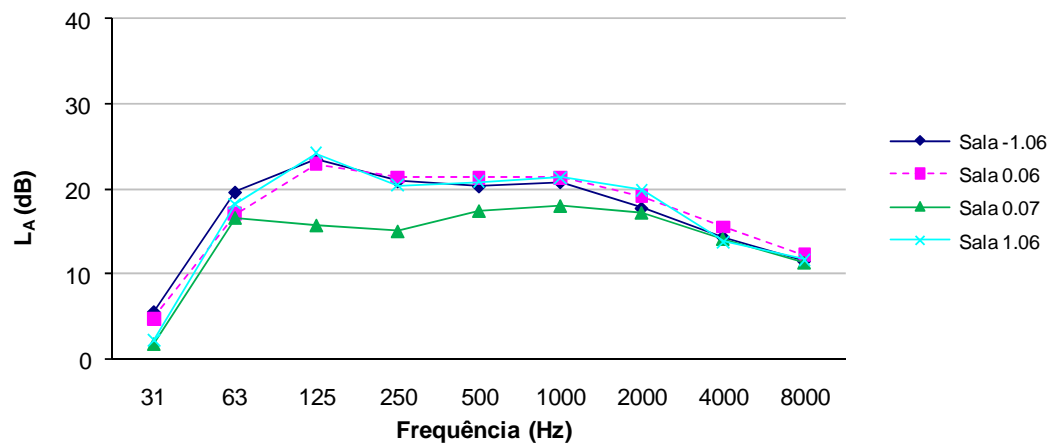


Figura 7.25 –  $L_A$  médios do ruído de fundo por banda de frequência com o equipamento de ventilação desligado nas salas rehabilitadas da Escola Secundária Rodrigues de Freitas

Os resultados podem ser mais facilmente comparáveis calculando a diferença dos níveis de pressão sonora do ruído de fundo em cada uma das salas (figura 7.26).

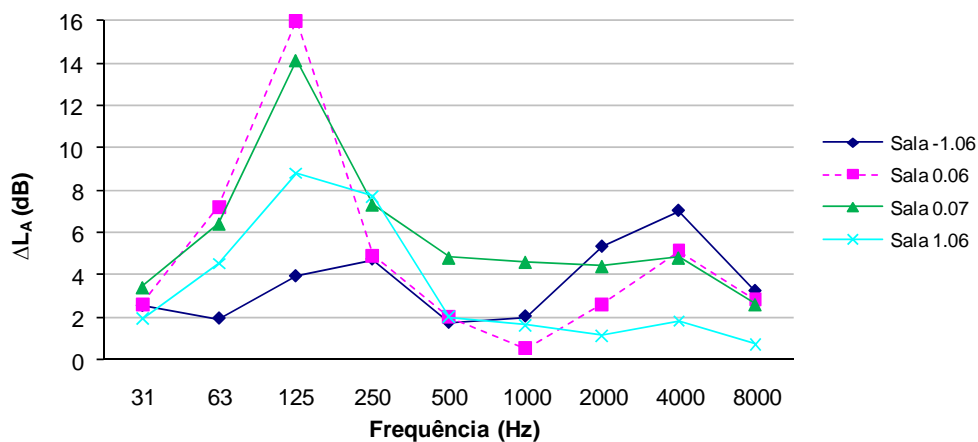


Figura 7.26 – Diferença dos níveis de pressão sonora do ruído de fundo por banda de frequência nas salas rehabilitadas da Escola Secundária Rodrigues de Freitas ( $\Delta L_A = L_A$  ligado -  $L_A$  desligado)



Analisando as figuras 7.24 a 7.26 verifica-se que o funcionamento dos equipamentos de ventilação induz aumentos significativos do nível sonoro do ruído de fundo por bandas de frequência, chegando a haver diferenças de 16 dB (125 Hz na sala 0.06).

Os equipamentos não originam aumentos do nível sonoro do ruído de fundo por bandas de frequência iguais em todas as salas. Na figura 7.25 é possível observar que as salas têm, de um modo geral, o mesmo nível sonoro do ruído de fundo por bandas de frequência sem o funcionamento da ventilação, excepto na sala 0.07 devido à existência de janela dupla. Já na figura 7.26 as grandes diferenças entre os gráficos indicam o acréscimo diferenciado, por sala de aula, nos níveis de pressão sonora do ruído de fundo por banda de frequência, derivado do funcionamento do sistema de ventilação.

Nos quadros 7.31 e 7.32 indicam-se os valores médios do nível de pressão sonora e do nível sonoro do ruído de fundo em cada sala, nas duas situações estudadas, e as respectivas diferenças.

Quadro 7.31 – Níveis de pressão sonora médios do ruído de fundo com e sem ventilação e a respectiva diferença nas salas da Escola Secundária Rodrigues de Freitas

Sala	L com ventilação (dB)	L sem ventilação (dB)	$\Delta L$ (dB)
-1.06	51,5	49,0	2,5
0.06	56,4	47,6	8,8
0.07	51,7	45,4	6,3
1.06	52,4	47,3	5,2

Quadro 7.32 – Níveis sonoros médios do ruído de fundo com e sem ventilação e a respectiva diferença nas salas da Escola Secundária Rodrigues de Freitas

Sala	$L_A$ com ventilação (dB)	$L_A$ sem ventilação (dB)	$\Delta L_A$ (dB)	$\Delta L_A$ (dB) considerando idêntico $L_A$ sem ventilação (28 dB)
-1.06	32,5	28,9	3,6	5
0.06	39,6	29,0	10,6	12
0.07	32,8	25,1	7,7	5
1.06	35,3	29,3	6,1	7

Nestes dois quadros também é visível a influência diferenciada do funcionamento da ventilação destacando-se as diferenças da sala 0.06. Estas diferenças podem ficar a dever-se a falhas na execução do isolamento das condutas de ventilação ou na ligação dos sistemas de ventilação com as paredes. Uma pequena falha nestes pontos normalmente leva a problemas acústicos relacionados com a utilização destes sistemas. O valor recomendado de 35 dB(A) para o nível sonoro máximo do ruído de fundo [14] é cumprido em todas as salas excepto na sala 0.06.

Admitindo idêntico nível sonoro sem ventilação em todas as salas, verificam-se acréscimos de 5 a 12 dB(A) no ambiente sonoro das salas, o que é assinalável de forma muito negativa.

O limite do RRAE a verificar pelo nível de avaliação do ruído particular de equipamentos é de 35 dB(A) quando o equipamento tem um funcionamento contínuo (quadro 5.6). Através do quadro 7.33 verifica-se que a sala 0.06 apresenta o valor mais elevado do nível de avaliação  $L_{Ar,nT}$ , com um valor de 37,7 dB. Nesta sala o cumprimento do RRAE apenas é alcançado com a adição do factor I, enquanto que nas salas -1.06 e 1.06 o limite é respeitado sem a Incerteza.

Quadro 7.33 – Verificação do limite imposto pelo actual RRAE para o valor de  $L_{Ar,nT}$  nas salas reabilitadas da Escola Secundária Rodrigues de Freitas

Sala	$L_{Ar,nT}$ (dB)	$L_{Ar,nT} + I$ (dB)	Imposição legal (dB) [Art. 7º - 1f)]	Art. 7º - 1f) Dec. Lei nº 96/2008
-1.06	28,2	25,2	≤ 35	CUMPRE
0.06	37,7	34,7	≤ 35	CUMPRE
1.06	31,9	28,9	≤ 35	CUMPRE

I=-3 dB (Incerteza)

Para avaliar o incómodo provocado pelo ruído dos equipamentos de ventilação sobrepôs-se o espectro do ruído de fundo obtido com a ventilação ligada às curvas NC e NR (figuras 7.27 e 7.28). Com o auxílio de um programa informático [77, 78] obtiveram-se as classificações NC e NR de cada sala de aula analisada, conforme indicado no quadro 7.34.

Quadro 7.34 – Classificação NC e NR das salas reabilitadas da Escola Secundária Rodrigues de Freitas

	Sala -1.06	Sala 0.06	Sala 0.07	Sala 1.06
NC	23	37	27	31
NR	26	37	27	31

Os valores máximos recomendados de NC e NR para salas de aula são NC-30 [11] e NR 35 [12], respectivamente. A sala 0.06 apresenta os valores mais elevados de NC e NR e ambas as recomendações são ultrapassadas. Nas restantes salas, as classificações NC e NR obtidas são inferiores aos máximos, excepto na sala 1.06 onde o valor de NC excede NC-30.

A grande vantagem deste tipo de análise é a possibilidade de verificar, através do espectro sonoro, qual é a banda de frequência crítica que mais contribui para o incómodo dos utilizadores. Nas curvas NC a banda de frequências crítica em todas as salas é a de 125 Hz enquanto que nas curvas NR a banda de frequências crítica é a de 125 Hz nas salas 0.06, 0.07 e 1.06 e a banda de frequências de 4000 Hz na sala -1.06.

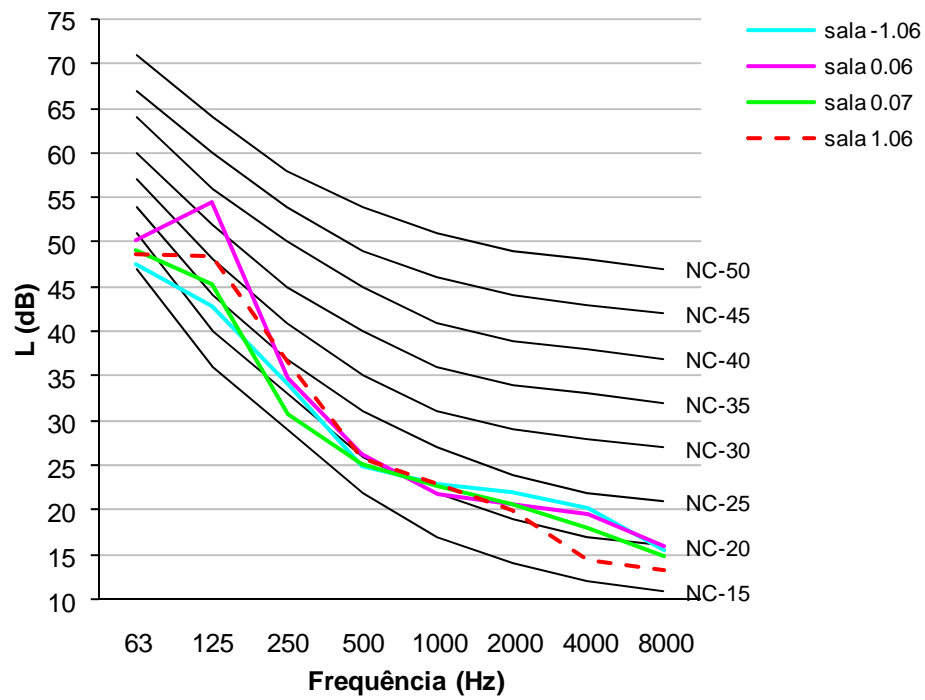


Figura 7.27 – Avaliação da incomodidade do ruído dos equipamentos segundo as curvas NC nas salas reabilitadas da Escola Secundária Rodrigues de Freitas

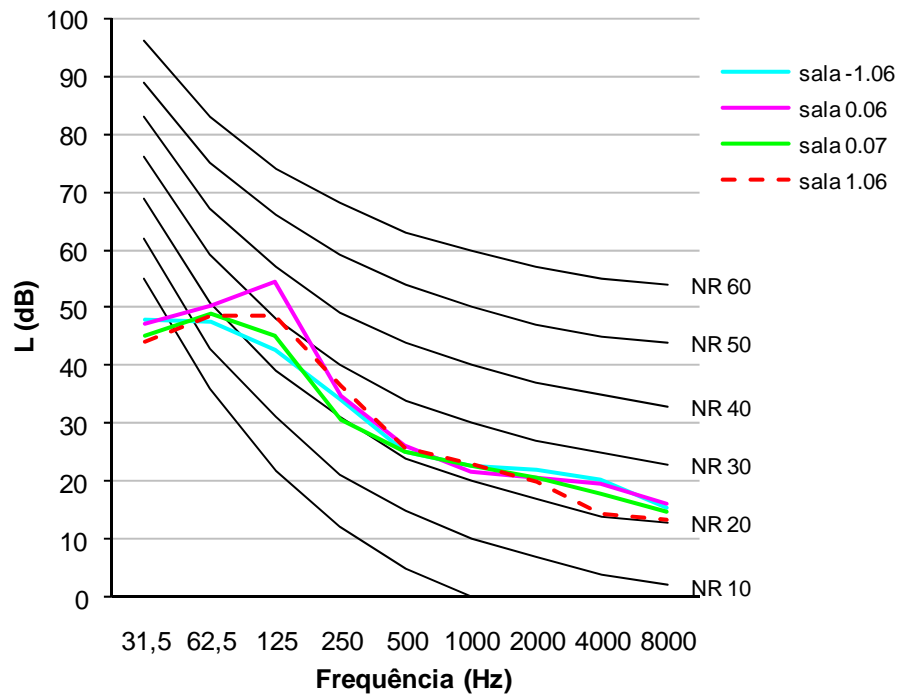


Figura 7.28 – Avaliação da incomodidade do ruído dos equipamentos segundo as curvas NR nas salas reabilitadas da Escola Secundária Rodrigues de Freitas

#### 7.4. COMPARAÇÃO DO EFEITO DA REABILITAÇÃO

Nos quadros 7.35 e 7.36 apresenta-se a comparação dos diferentes parâmetros acústicos obtidos neste trabalho (2010) e os parâmetros acústicos obtidos antes da reabilitação (2008), presentes no relatório do LAIC.

Através do quadro 7.35 verifica-se que houve uma melhoria dos índices de isolamento sonoro, em particular entre o piso 1 e o piso 0. Uma vez que a análise do isolamento sonoro entre estes dois pisos feita em 2008 englobava duas salas “antigas”, ou seja, salas onde não tinha sido feita nenhuma intervenção, o efeito da reabilitação é mais acentuado.

A melhoria não é tão significativa entre o piso 0 e o piso -1 uma vez que a comparação do isolamento sonoro entre o piso 0 e -1 antes e após a reabilitação da escola é feita com os valores de  $D_{n,w}$  e  $L'_{n,w}$  obtidos em 2008 entre uma sala modelo, isto é, uma sala que já tinha algumas soluções de reabilitação implementadas, e uma sala “antiga”.

No caso do isolamento sonoro entre o corredor e a sala de aula, a comparação feita no quadro 7.35 diz respeito a duas salas reabilitadas. A sala na qual foi medido o índice de isolamento sonoro da parede de separação em 2008 era uma sala modelo, pelo que a comparação agora feita apenas permite verificar que as paredes de separação entre o corredor e as salas de aula têm isolamentos sonoros semelhantes. O mesmo se passa no índice de isolamento sonoro a ruídos de condução aérea das fachadas. A sala analisada em 2008 já era uma sala com modificações, pelo que se observa que a sala estudada em 2010 alcançou um  $D_{2m,n,w}$  semelhante.

Quadro 7.35 – Comparação dos valores dos índices de isolamento sonoro obtidos antes da reabilitação (2008) e após a reabilitação (2010) ( $\Delta = \text{índice}_{2010} - \text{índice}_{2008}$ )

Elemento separador	Antes da reabilitação (2008)			Após a reabilitação (2010)			$\Delta$		
	$D_{n,w}$ (dB)	$L'_{n,w}$ (dB)	$D_{2m,n,w}$ (dB)	$D_{n,w}$ (dB)	$L'_{n,w}$ (dB)	$D_{2m,n,w}$ (dB)	$D_{n,w}$ (dB)	$L'_{n,w}$ (dB)	$D_{2m,n,w}$ (dB)
Laje 1.06/0.06	44	78	–	49	64	–	+5	-14	–
Laje 0.06/-1.06	37	73	–	38	69	–	+1	-4	–
Corredor/sala	20	–	–	19	–	–	-1	–	–
Fachada sala 0.06	–	–	22	–	–	23	–	–	+1

Relativamente às características acústicas de cada sala de aula, apenas se pode comparar o tempo de reverberação (quadro 7.36). O tecto falso absorvente aplicado em cada sala levou a uma diminuição significativa do tempo de reverberação na sala -1.07. Nas restantes salas, apesar de não haver valores antes da reabilitação, a reverberação também deverá ter diminuído consideravelmente, uma vez que as salas têm muitas semelhanças.

Como em 2008 as salas não estavam dotadas com equipamentos de ventilação, não é possível comparar os parâmetros relativos ao ruído provocado por estes equipamentos.

Quadro 7.36 – Comparação dos valores do tempo de reverberação obtidos antes da reabilitação (2008) e após a reabilitação (2010) ( $\Delta TR = TR_{2010} - TR_{2008}$ ) e valores de  $L_{Ar,nT}$ , NC e NR obtidos em cada sala após a reabilitação (2010)

Local	Antes da reabilitação (2008)	Após a reabilitação (2010)			$\Delta TR$ (s)	
	TR médio (s)	TR médio (s)	$L_{Ar,nT}$ (dB)	NC		NR
Sala -1.07	1,7	1,0	–	–	–	-0,7
Sala -1.06	–	1,0	28,2	23	26	–
Sala 0.06	–	0,9	37,7	37	37	–
Sala 0.07	–	–	–	27	27	–
Sala 1.06	–	1,0	31,9	31	31	–



## 8

## CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

### 8.1. CONCLUSÕES

Este estudo teve como principal objectivo caracterizar a qualidade acústica de escolas secundárias após recente reabilitação, tendo sido analisado o caso da Escola Secundária Rodrigues de Freitas no Porto. Para tal, foram feitas medições *in situ* de alguns parâmetros acústicos de modo a ser possível a comparação com os valores obtidos em medições realizadas antes das obras de requalificação.

Além da caracterização, o trabalho teve também como objectivo demonstrar que é possível respeitar os regulamentos e as recomendações sobre o desempenho acústico das salas de aula e sensibilizar todos os intervenientes no processo de reabilitação da importância da acústica dos locais de ensino para o bem-estar e sucesso quer de alunos quer de professores.

Os parâmetros analisados foram o isolamento sonoro a ruídos de condução aérea e ruídos de percussão, através dos índices  $D_{nT,w}$ ,  $D_{2m,nT,w}$  e  $L'_{nT,w}$ , o tempo de reverberação, TR, o ruído de fundo e o ruído dos equipamentos de ventilação, analisado através do  $L_{Ar,nT}$  e das curvas de incomodidade NC e NR.

Em relação ao isolamento sonoro entre salas, conclui-se que com a intervenção verificaram-se melhorias no isolamento resultado das soluções de reabilitação adoptadas para as lajes. As duas situações mais preocupantes são o isolamento sonoro a ruídos de condução aérea da parede de separação do corredor com a sala e da fachada das salas. No quadro 8.1 apresentam-se os valores dos diferentes índices obtidos em cada sala.

Quadro 8.1 – Quadro resumo dos índices de isolamento sonoro obtidos na Escola Secundária Rodrigues de Freitas após a reabilitação

Elemento separador	$D_{nT,w}$ (dB)	$L'_{nT,w}$ (dB)	$D_{2m,nT,w}$ (dB)
Laje [Sala 1.06 x Sala 0.06]	57	56	–
Laje [Sala 0.06 x Sala -1.06]	46	60	–
Parede [Corredor x Sala 0.06]	27	–	–
Fachada sala 0.06	–	–	31

O tempo de reverberação das salas reabilitadas verifica o regulamento em vigor em Portugal. No entanto, são valores ainda um pouco elevados considerando os ideais para uma boa inteligibilidade da palavra em salas de aula. Comparando com os valores anteriores as obras de renovação da escola, há uma melhoria significativa. No quadro 8.2 estão indicados os valores obtidos do tempo de reverberação por salas.

Quadro 8.2 – Tempos de reverberação das salas reabilitadas da Escola Secundária Rodrigues de Freitas

Local	TR médio (s)
	[500;1000;2000] Hz
Sala -1.07	1,0
Sala -1.06	1,0
Sala 0.06	0,9
Sala 1.06	1,0

Relativamente ao ruído de fundo e dos equipamentos, constata-se que o funcionamento da ventilação provoca aumentos diferenciados do nível de ruído de fundo nas salas reabilitadas analisadas, sendo a sala 0.06 a que tem maiores problemas. A recomendação de 35 dB(A) para o nível sonoro máximo do ruído de fundo apenas não é alcançada na sala 0.06. Nesta sala também não é respeitado o limite máximo recomendado da curva de incomodidade NR (NR 35), assim como, conjuntamente com a sala 1.06, não é respeitado o máximo recomendado para a curva de incomodidade NC (NC30). No quadro 8.3 apresenta-se um resumo dos resultados obtidos.

Quadro 8.3 – Quadro resumo dos resultados relacionados com o ruído de fundo e equipamentos obtidos na Escola Secundária Rodrigues de Freitas após a reabilitação

Sala	L <sub>A</sub> com ventilação (dB)	NC	NR
-1.06	33	23	26
0.06	40	37	37
0.07	33	27	27
1.06	35	31	31

Pode-se concluir que a reabilitação acústica da escola foi realizada com sucesso pois verificam-se melhorias significativas do isolamento sonoro a ruídos de condução aérea e a ruídos de percussão e do tempo de reverberação das salas de aula. Em termos regulamentares, todos os objectivos foram atingidos uma vez que os limites definidos no RRAE foram verificados, ainda que, em algumas situações, com a adição da Incerteza.

Também é possível concluir que a mudança da fórmula de cálculo do isolamento sonoro introduzida pela entrada em vigor do RRAE de 2008, passando os índices de isolamento sonoro normalizados para índices de isolamento sonoro padronizados, permite alcançar mais facilmente os limites regulamentares. Se a análise fosse feita com os índices normalizados apenas dois dos seis índices calculados é que verificariam o RRAE.



## **8.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS**

Em desenvolvimentos futuros outros parâmetros acústicos poderiam ser ensaiados para completar o estudo, tais como a Claridade ( $C_{50}$ ), a Definição ( $D_{50}$ ) e o RASTI, uma vez que são parâmetros também relacionados com a inteligibilidade da palavra.

Para confirmar as diferenças entre as salas antigas e as salas reabilitadas, poderia ser elaborado um questionário para professores e alunos que já pertencessem à comunidade escolar antes de ser feita a intervenção na escola. Através da análise dos parâmetros acústicos subjectivos seria possível verificar a eficácia das diferentes soluções construtivas adoptadas na reabilitação dos diferentes espaços escolares.

Aproveitando o facto de o edifício passar a albergar o Conservatório de Música do Porto, poderiam ser analisadas as diferenças da acústica das salas de música e das salas destinadas à palavra, efectuando medições acústicas nas salas do Conservatório e posteriormente a comparação com as salas de aula da Escola Secundária Rodrigues de Freitas.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Carvalho, A. P. Oliveira de. *Acústica Ambiental e de Edifícios*, versão 7.2. FEUP, Porto, 2009.
- [2] <http://lisboaverde.cm-lisboa.pt/index.php?id=4227> acessido em Maio 2010.
- [3] Farren, Jon. *Acoustic Design Guide – Rooms for speech*. Marshall Day Acoustics Ltd, Nova Zelândia, 2003.
- [4] EN ISO 11654:1997. *Acoustics. Sound absorbers for use in buildings. Rating of sound absorption (EN ISO 11654:1997)*.
- [5] Department for Education and Skills. *Building Bulletin 93 – Acoustic Design for Schools*. Londres, 2003.
- [6] NP EN ISO 717-1:2009. *Acústica. Determinação do isolamento sonoro em edifícios e de elementos de construção. Parte 1: Isolamento sonoro a sons de condução aérea (ISO 717-1:1996 + A1:2006)*.
- [7] NP EN ISO 717-2:2009. *Acústica. Determinação do isolamento sonoro em edifícios e de elementos de construção, Parte 1: Isolamento sonoro a sons de percussão (ISO 717-2:1996 + A1:2006)*.
- [8] Martins, Cátia. *Caracterização das duas Igrejas de Santo Ovídio, Mafamude*. Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, FEUP, Porto, 2010.
- [9] Building Research Association of New Zealand Ltd. *Designing Quality Learning Spaces: Acoustics*. New Zealand Ministry of Education, Wellington, 2007.
- [10] <http://www.acoustics.salford.ac.uk/feschools/waves/wavetypes3.htm> acessido em Maio 2010.
- [11] [http://www.engineeringtoolbox.com/nc-noise-criterion-d\\_725.html](http://www.engineeringtoolbox.com/nc-noise-criterion-d_725.html) acessido em Abril 2010.
- [12] [http://www.engineeringtoolbox.com/nr-noise-rating-d\\_60.html](http://www.engineeringtoolbox.com/nr-noise-rating-d_60.html) acessido em Abril 2010.
- [13] Marczinske, Knut. *Classroom Acoustics – An Academic Playground or a Major Subject for Qualified Education?* 4<sup>th</sup> European Conference on Noise Control, Patras, 2001.
- [14] Hagen, Mechthild *et al.*. *Acoustic school design*. Forum Acusticum Sevilla, 2002.
- [15] Shield, Bridget, Dockrell, Julie. *The effects of noise on children at school: a review*. J. Building Acoustics 10 (2), 97-106, 2003.
- [16] Shield, Bridget, Dockrell, Julie. *The effects of environmental and classroom noise on the academic attainments of primary school children*. J. Acoust. Soc. Am., 123 (1), 133-144, 2008.
- [17] Sutherland, L. C., Lubman, D.. *The Impact of Classroom Acoustics on Scholastic Achievement*. 17<sup>th</sup> International Congress on Acoustics, Roma, 2001.
- [18] *Classroom Acoustics II - Acoustical Barriers to learning*. Technical Committee on Architecture of the Acoust. Soc. of Am., 2002.
- [19] Bradley, J. S.. *Does Classroom Assist or Impede the Learning Process?* Institute for Research in Construction, Ottawa, 2007.
- [20] Klatte, Maria *et al.*. *Effects of classroom reverberation time on speech perception and noise ratings in elementary school children: a field study*. Euronoise 2006, Tampere.

- [21] Efentakis, A. *et al.*. *Noise and Acoustic Surveys of London Primary Schools*. Euronoise 2003, Naples.
- [22] World Health Organization. *Guidelines for community noise*. Genebra, 1999.
- [23] Machado, Heloísa *et al.*. *A interferência do ruído produzido em espaços abertos nos recursos vocais de professores*. Acústica 2008, Coimbra.
- [24] Astolfi, A *et al.*. *Classroom Acoustic Assessment: Analysis of Subjective Answers and Measured Indices*. Euronoise 2003, Naples.
- [25] Bradley, J.S., Sato, H.. *The intelligibility of speech in elementary school classrooms*. J. Acoust. Soc. Am., 123 (4), 2078-2086, 2008.
- [26] <http://www.parque-escolar.pt/escola-secundaria-passos-manuel.php> acessido em Abril 2010.
- [27] <http://www.igespar.pt/pt/patrimonio/pesquisa/geral/patrimonioimovel/detail/70885/> acessido em Abril 2010.
- [28] *Manual de projecto: Arquitectura*. Parque Escolar, Lisboa, 2009.
- [29] <http://www.parque-escolar.pt/m-enquadramento-Historico-parque-escolar.php> acessido em Março 2010.
- [30] <http://www.skyscrapercity.com/showthread.php?t=596758&page=3> acessido em Maio 2010.
- [31] <http://www.bing.com/maps/> acessido em Maio 2010.
- [32] <http://www.parque-escolar.pt/m-estruturao-execucao-programa.php> acessido em Março 2010.
- [33] <http://www.parque-escolar.pt/m-programa-objectivos.php> acessido em Março de 2010.
- [34] Decreto-lei 41/2007 de 21 de Fevereiro.
- [35] <http://www.partnershipsforschools.org.uk/about/aboutbsf.jsp> acessido em Abril 2010.
- [36] [http://www.teachernet.gov.uk/management/resourcesfinanceandbuilding/Primary\\_Capital\\_Programme/](http://www.teachernet.gov.uk/management/resourcesfinanceandbuilding/Primary_Capital_Programme/) acessido em Abril 2010.
- [37] [http://www.partnershipsforschools.org.uk/media/press/pr\\_2009-10-16-Acoustics\\_standards\\_15\\_10\\_09.jsp](http://www.partnershipsforschools.org.uk/media/press/pr_2009-10-16-Acoustics_standards_15_10_09.jsp) acessido em Maio 2010.
- [38] [http://www.partnershipsforschools.org.uk/library/mds\\_overview.jsp](http://www.partnershipsforschools.org.uk/library/mds_overview.jsp) acessido em Maio 2010.
- [39] <http://www.teachernet.gov.uk/management/resourcesfinanceandbuilding/bsf/projects/> acessido em Abril 2010.
- [40] <http://www.partnershipsforschools.org.uk/programme/progress.jsp> acessido em Abril 2010.
- [41] <http://www.teachernet.gov.uk/management/resourcesfinanceandbuilding/bsf/aboutbsf/> acessido em Abril 2010.
- [42] [http://www.bradford.gov.uk/bmdc/education\\_and\\_skills/schools/bsf/bsf\\_phase\\_1.htm](http://www.bradford.gov.uk/bmdc/education_and_skills/schools/bsf/bsf_phase_1.htm) acessido em Abril 2010.
- [43] <http://www2.ed.gov/policy/gen/leg/recovery/modernization/index.html> acessido em Abril 2010.
- [44] *State policies for school construction and renovation: Seen through a Community Preservation Lens*. National Trust for Historic Preservation, Estados Unidos da América, 2003.
- [45] <http://www.ncef.org/school-modernization/> acessido em Abril 2010.

- [46] <http://www.opsc.dgs.ca.gov/Programs/SFProgams/Mod.htm> acessido em Abril 2010.
- [47] *School Facility Program Handbook*. Office of Public School Construction, Sacramento, Estados Unidos da América, 2008.
- [48] <http://www.deewr.gov.au/Schooling/BuildingTheEducationRevolution/Pages/default.aspx> acessido em Abril 2010.
- [49] National School Pride Round 1 Fact Sheet.  
[http://www.deewr.gov.au/Schooling/BuildingTheEducationRevolution/Documents/090402BER%20Nat.Sch.PrideProgram\\_Factsheet.pdf](http://www.deewr.gov.au/Schooling/BuildingTheEducationRevolution/Documents/090402BER%20Nat.Sch.PrideProgram_Factsheet.pdf) acessido em Maio 2010
- [50] National School Pride Round 2 Fact Sheet.  
[http://www.deewr.gov.au/Schooling/BuildingTheEducationRevolution/Documents/BER%20Nat.Sch.PrideProgram\\_Factsheet\\_Round%20Two.pdf](http://www.deewr.gov.au/Schooling/BuildingTheEducationRevolution/Documents/BER%20Nat.Sch.PrideProgram_Factsheet_Round%20Two.pdf) acessido em Maio 2010
- [51] BER Science and Language Centres Guidance Memo.  
[http://www.deewr.gov.au/Schooling/BuildingTheEducationRevolution/Documents/GM\\_3\\_LanguageLearningCentres\\_Sept09.pdf](http://www.deewr.gov.au/Schooling/BuildingTheEducationRevolution/Documents/GM_3_LanguageLearningCentres_Sept09.pdf) acessido em Maio 2010
- [52] *Building better schools: investing in Scotland's future*. Scottish Government, Edimburgo, 2009.
- [53] *School Design: Optimising the internal environment*. Scottish Executive, Edimburgo, 2007.
- [54] *Regulamento Geral do Ruído*. Decreto-lei 09/2007 de 17 de Janeiro.
- [55] *Regulamento de Requisitos Acústicos em Edifícios*. Decreto-lei 96/ 2008 de 9 de Junho.
- [56] Department for Education and Skills. *Building Bulletin 87 – Guidelines for Environmental Design in Schools*. Londres, 2003.
- [57] *Classroom Acoustics*. Technical Committee on Architecture of the Acoust. Soc. of Am., 2000.
- [58] Egan, M. David. *Architectural Acoustics*. J. Ross Publishing, Estados Unidos da América, 2007.
- [59] *ANSI S12.60 – Acoustical Performance Criteria, Design Requirements, and Guidelines for Schools*. Acoust. Soc. of Am., 2009.
- [60] AS/NZ 2107:2000. *Acoustics – Recommended Design Sound Levels and Reverberation Times for Building Interiors*.
- [61] *Renovar: 003 – Escola Secundária Rodrigues de Freitas, Conservatório de Música do Porto*. Parque Escolar, Lisboa, 2008.
- [62] [http://www.aaalah.pt/index.php?option=com\\_content&view=article&id=50&Itemid=11](http://www.aaalah.pt/index.php?option=com_content&view=article&id=50&Itemid=11) acessido em Maio 2010.
- [63] <http://www.igespar.pt/pt/patrimonio/pesquisa/geral/patrimonioimovel/detail/8832381/> acessido em Março 2010.
- [64] Instituto da Construção. *Relatório da inspeção e diagnóstico – Escola Secundária Rodrigues de Freitas*. FEUP, Porto, 2006.
- [65] *Escola Secundária Rodrigues de Freitas, Praça Pedro Nunes • Porto, Projecto de Execução de Condicionamento Acústico*. In Acoustics, Engenharia Acústica, Vibrações e Ambiente Lda., Maia, 2007.
- [66] <http://www.bing.com/maps> acessido em Abril de 2010.

- [67] <http://www.parque-escolar.pt/escola-rodrigues-freitas.php> acedido em Maio de 2010.
- [68] <http://www.parque-escolar.pt/escolas/fichas/rodrigues-freitas.html> acedido em Maio de 2010.
- [69] <http://www.matercaima.pt/csm/produtos/celenit/paineis-isolantes-naturais-celenit/celenit-n.shtml?11150> acedido em Maio de 2010.
- [70] NP EN ISO 140-4:2000, *Acústica. Medição do isolamento sonoro de edifícios e de elementos de construção. Parte 4: Medição in situ do isolamento sonoro a sons aéreos entre compartimentos (ISO 140-4:1998)*.
- [71] NP EN ISO 140-7:2008, *Acústica. Medição do isolamento sonoro de edifícios e de elementos de construção. Parte 7: Medição in situ do isolamento sonoro de pavimentos a sons de percussão (ISO 140-7:1998)*.
- [72] NP EN ISO 140-5:2000, *Acústica. Medição do isolamento sonoro de edifícios e de elementos de construção. Parte 5: Medição in situ do isolamento sonoro a sons aéreos de fachadas e de elementos de fachadas (ISO 140-5:1998)*.
- [73] EN ISO 3382:1997, *Acoustics. Measurement of the reverberation of rooms with reference to other acoustical parameters*.
- [74] EN ISO 16032:2004 [1, 2, 3], *Acoustics. Measurement of sound pressure level for service equipment in buildings – Engineering method*.
- [75] Laboratório de Acústica do Instituto da Construção. *Escola Secundária Rodrigues de Freitas – Medição do isolamento sonoro a ruídos aéreos, percussão, fachadas e avaliação dos tempos de reverberação*. FEUP, 2008.
- [76] *Regulamento de Requisitos Acústicos em Edifícios*. Decreto-lei 129/ 2002 de 1 de Maio.
- [77] [http://www.engineeringtoolbox.com/nc-noise-criterion-d\\_517.html](http://www.engineeringtoolbox.com/nc-noise-criterion-d_517.html) acedido em Abril 2010.
- [78] [http://www.engineeringtoolbox.com/nr-noise-rating-d\\_518.html](http://www.engineeringtoolbox.com/nr-noise-rating-d_518.html) acedido em Abril 2010.