

# **CARACTERIZAÇÃO ACÚSTICA DE ESPAÇOS LETIVOS – ESCOLA SECUNDÁRIA SERAFIM LEITE**

**FRANCISCO DE OLIVEIRA VIEIRA**

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

---

Orientador: Professor Doutor António Pedro Oliveira Carvalho

FEVEREIRO DE 2021

## **MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2020/2021**

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 – 2020/2021 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2021.*

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

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

*“The ignorant man pronounces,  
the wise man questions and reflects”.*

*Aristóteles*



## **AGRADECIMENTOS**

Ao concluir este trabalho gostaria de mostrar a minha gratidão a todos os que, de uma forma ou outra, contribuíram para a sua realização, salientando um especial apreço:

Ao Professor Doutor António Pedro Oliveira de Carvalho pela orientação, paciência, disponibilidade e sugestões prestadas sempre que necessário.

Ao Engenheiro António Eduardo Batista da Costa pelo cuidado e dedicação nas medições acústicas fundamentais para este trabalho, assim como todos os conselhos e sugestões.

À direção da Escola Secundária Serafim Leite e aos seus funcionários pela oportunidade de fazer desta um caso de estudo, assim como a facilidade de acesso e ajuda dispensada.

Aos meus amigos por todos os momentos bem passados e apoio constante em toda esta caminhada.

À minha família, pela paciência e pelo apoio incondicional em todas as etapas da minha vida.

Aos meus pais, em especial à minha mãe, por ser a minha força, o meu maior apoio e a minha melhor amiga.

E por fim, mas não menos importante, à minha madrinha Bertina, por todo o apoio e incentivo, e que sem ela, esta longa caminhada não teria sequer começado.



## RESUMO

O presente trabalho pretende caracterizar a qualidade acústica de uma escola secundária e analisar o seu cumprimento legal atual, assim como sugerir algumas recomendações para melhoria acústica dos espaços.

Muitas escolas do país, no âmbito do “Parque Escolar, E.P.E.” (iniciativa criada pelo Governo Português em 2007 para requalificar e modernizar edifícios escolares em terreno nacional), têm vindo a sofrer alterações para melhorias dos espaços letivos e assim modernizá-las. Muitos outros edifícios escolares carecem de intervenções, e é num desses casos que este trabalho se foca: uma escola por reabilitar e a sua necessidade de intervenção a nível acústico.

Na sala de aula, a voz ou palavra, é o principal transporte de conhecimento entre professor/aluno, o que faz com que a sua inteligibilidade seja de maior importância. Assim, foi necessário medir esse parâmetro, bem como outros igualmente importantes para o conforto acústico da sala de aula tal como: o tempo de reverberação e os índices de isolamento sonoro.

Mas não apenas de salas de aulas se faz uma escola. Este trabalho, também visa outros espaços comuns numa escola, como a cantina e o ginásio, onde foi medido o tempo de reverberação e confrontado esses valores com a legislação em vigor.

Foi, portanto, analisado o caso específico da Escola Secundária Serafim Leite, um edifício escolar não reabilitado pelo “Parque Escolar E.P.E.”. Construído nos anos 1970, inicialmente como Escola Industrial e que no ano letivo de 1977/1978 se transformaria em Escola Secundária. Entretanto, ao longo da sua existência foi sujeita a poucas alterações, excetuando uma expansão, com a construção da nova biblioteca, auditório e polivalente.

Foram efetuadas, *in situ*, medições acústicas do tempo reverberação de alguns espaços letivos assim como medições para calcular o índice de isolamento sonoro a ruídos de condução aérea padronizado ( $D_{nT,w}$ ), índice de isolamento sonoro a ruídos de percussão padronizado ( $L'_{nT,w}$ ) e RASTI.

Foram obtidos resultados de tempo de reverberação médio (500-2k Hz) de 1,1 s para uma sala de aula típica, 2,5 s para a cantina e 4,4 s para o ginásio. Para as paredes divisórias entre salas foram obtidos valores de  $D_{nT,w}$  de 44 dB e de 23 dB para paredes que separam o corredor da sala. Para laje chegaram-se a valores de  $L'_{nT,w}$  de 64 dB. Os valores de tempo de reverberação e  $D_{nT,w}$  da parede que separa o corredor da sala não eram conformes com os limites legais. Por fim, analisou-se o RASTI da sala e concluiu-se que a sala tem uma inteligibilidade *Suficiente*. Medidas de melhoria foram sugeridas.

No fim, foi também possível comparar os resultados deste trabalho, com os obtidos em um trabalho semelhante, efetuado na Escola Secundária de Gondomar que é uma escola intervencionada pela “Parque Escola E.P.E.”.

**PALAVRAS-CHAVE:** Acústica, escolas, tempo de reverberação, inteligibilidade da palavra, índices de isolamento sonoro.



## ABSTRACT

This work aims to characterize the acoustic quality of a high school and analyze its current legal compliance, as well as recommendations to improve the spaces acoustically.

Many schools in the country, within the program “*Parque Escolar, E.P.E.*” (an initiative created by the Portuguese Government in 2007 to re-qualify and modernize school buildings on Portuguese territory), have been going under changes to improve school spaces and thus, modernize them. Many other school buildings lack these interventions, and it is on this topic that this work will give more focus: to a school that has not gone through rehabilitation and its needs of acoustic intervention.

In the classroom, the voice or the spoken word is the main way to transmit knowledge between the teacher and the students, which makes intelligibility more important. Thus, it was necessary to measure this parameter, as well as others equally important, for acoustic comfort on the classroom, such as the reverberation time and sound insulation indexes.

But not only from classrooms a school is made. This work also aims to analyze other common spaces in a school, such as canteen, gymnasium, library and auditorium, where it was necessary to make measurements in the same way.

Therefore, it was studied the specific case of the Escola Secundária Serafim Leite, a school building that was not rehabilitated by the “*Parque Escolar, E.P.E.*” program. Built in the 1970’s, it would suffer few alterations: except an expansion where it was built the new library, auditorium and multipurpose hall.

Acoustic measurements like RASTI and reverberation time, were made, within the school, as well as measurements to calculate the sound insulation indexes to airborne noises ( $D_{nT,w}$ ) and to structure borne noises ( $L'_{nT,w}$ ).

Average reverberation times of 1,1 s for a typical classroom, 2,5 s for the canteen and 4,4 s for the gymnasium were obtained.  $D_{nT,w}$  values of 44 dB were obtained for the partition walls between classrooms and 23 dB for the wall that separate de access corridor and classroom. For the slab the values of  $L'_{nT,w}$  were 64 dB. The reverberation times and the  $D_{nT,w}$  of the wall between the access corridor and the classroom were below the minimum requirements of today’s legislation. Finally, the classroom RASTI was analyzed and it was concluded that it has *Sufficient* intelligibility. Improvement measures were suggested.

In the end, it was also possible to compare the results of this work, with the ones of a similar project on the Escola Secundária de Gondomar, which is a school acoustically intervened by the “*Parque Escolar, E.P.E.*” program.

**KEYWORDS:** Acoustics, schools, reverberation time, word intelligibility, sound insulation indexes.



## ÍNDICE GERAL

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	i
<b>RESUMO</b> .....	iii
<b>ABSTRACT</b> .....	v
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	xi
<b>ÍNDICE DE QUADROS</b> .....	xv
<b>SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS</b> .....	xix
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	1
1.1. ENQUADRAMENTO E OBJETIVOS .....	1
1.2. ESTRUTURA DA TESE .....	2
<b>2. CONCEITOS E DEFINIÇÕES ACÚSTICAS</b> .....	3
2.1. CONCEITOS TEÓRICOS BÁSICOS .....	3
2.1.1. O SOM .....	3
2.1.2. PRESSÃO .....	3
2.1.3. INTENSIDADE E POTÊNCIA SONORA .....	5
2.1.4. NÍVEIS DE PRESSÃO .....	5
2.1.5. FREQUÊNCIA .....	7
2.2. ABSORÇÃO SONORA .....	9
2.2.1. A ABSORÇÃO SONORA .....	9
2.2.2. MATERIAIS ABSORVENTES E SISTEMAS .....	10
2.2.2.1. Porosos e Fibrosos .....	10
2.2.2.2. Ressonadores .....	11
2.2.2.3. Membranas .....	12
2.3. TEMPO DE REVERBERAÇÃO .....	12
2.3.1. DEFINIÇÃO .....	12
2.3.2. FÓRMULA DE SABINE .....	13
2.3.3. FÓRMULA DE EYRING .....	14
2.3.4. FÓRMULA DE MILLINGTON-SETTE .....	14
2.3.5. FORMULAÇÃO GENÉRICA .....	15
2.4. ISOLAMENTO SONORO .....	16

2.4.1. INTRODUÇÃO .....	16
2.4.2. RUÍDOS DE CONDUÇÃO AÉREA .....	17
2.4.3. RUÍDOS DE PERCUSSÃO .....	18
<b>2.5. INTELIGIBILIDADE DA PALAVRA .....</b>	<b>21</b>
2.5.1. INTRODUÇÃO .....	21
2.5.2. PARÂMETROS DE MEDIDA .....	22
<b>3. ESTADO DA ARTE .....</b>	<b>25</b>
3.1. GENERALIDADES .....	25
3.2. RUÍDO E APRENDIZAGEM .....	25
3.3. TEMPO DE REVERBERAÇÃO E APRENDIZAGEM .....	28
3.4. IMPACTO NOS PROFESSORES .....	29
3.5. CANTINAS E GINÁSIOS ESCOLARES .....	30
3.5.1. INTRODUÇÃO .....	30
3.5.2. CANTINAS ESCOLARES .....	30
3.5.3. GINÁSIOS ESCOLARES .....	30
3.6. CUSTO DA MELHORIA DE SALAS DE AULA .....	31
<b>4. LEGISLAÇÃO .....</b>	<b>37</b>
4.1. PORTUGAL .....	37
4.2. REINO UNIDO .....	39
4.3. ESTADOS UNIDOS DA AMÉRICA .....	43
4.4. ESPANHA .....	45
4.5. BRASIL .....	47
4.6. AUSTRÁLIA .....	47
<b>5. CARACTERIZAÇÃO DO CASO DE ESTUDO .....</b>	<b>51</b>
5.1. HISTÓRIA .....	51
5.2. A ESCOLA .....	51
5.3. ESPAÇOS EM ESTUDO .....	53
5.3.1. SALA 9 .....	53
5.3.2. CANTINA .....	55
5.3.3. GINÁSIO .....	56

<b>6. ENSAIOS</b> .....	57
<b>6.1. METODOLOGIA</b> .....	57
<b>6.2. TEMPO DE REVERBERAÇÃO</b> .....	57
6.2.1. MÉTODO .....	57
6.2.2. RESULTADOS.....	59
6.2.3. DISCUSSÃO DE RESULTADOS .....	62
6.2.4. CUMPRIMENTO DO RRAE .....	64
<b>6.3. ISOLAMENTO SONORO A RUÍDOS DE CONDUÇÃO AÉREA</b> .....	66
6.3.1. MÉTODO .....	66
6.3.2. RESULTADOS.....	69
6.3.3. DISCUSSÃO DE RESULTADOS .....	70
6.3.4. CUMPRIMENTO DO RRAE .....	70
<b>6.4. ISOLAMENTO SONORO A RUÍDOS DE PERCUSSÃO</b> .....	71
6.4.1. MÉTODO .....	71
6.4.2. RESULTADOS.....	73
6.4.3. DISCUSSÃO DE RESULTADOS .....	74
6.4.4. CUMPRIMENTO DO RRAE .....	74
<b>6.5. RASTI</b> .....	75
6.5.1. MÉTODO .....	75
6.5.2. RESULTADOS.....	76
6.5.3. DISCUSSÃO DE RESULTADOS .....	76
<b>7. O EFEITO DA ACÚSTICA</b> .....	79
<b>7.1. COMPARAÇÃO COM A ESCOLA SECUNDÁRIA DE GONDOMAR</b> .....	79
7.1.1. COMPARAÇÃO .....	79
7.1.2. TEMPO DE REVERBERAÇÃO.....	79
7.1.3. ÍNDICES DE ISOLAMENTO SONORO.....	80
7.1.4. RASTI.....	81
<b>7.2. BREVES SUGESTÕES DE MELHORIA PARA A ESCOLA SECUNDÁRIA SERAFIM LEITE</b> .....	81
7.2.1. ESPAÇOS/PARÂMETROS A SEREM TRATADOS .....	81
7.2.2. MELHORIA DO $D_{NT,W}$ DA PAREDE QUE SEPARA CORREDOR DA SALA 9 .....	81
7.2.3. MELHORIA DO TEMPO DE REVERBERAÇÃO .....	82

7.2.3.1. Propostas de Intervenção .....	82
7.2.3.2. Previsão dos Tempos de Reverberação .....	85
7.2.3.3. Análise Económica .....	89
<b>8. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS .....</b>	<b>97</b>
<b>8.1. CONCLUSÕES .....</b>	<b>97</b>
<b>8.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS .....</b>	<b>98</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>101</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Propagação do som. Fonte pontual. [6].....	4
Figura 2.2 – Escala de pressão sonora (Pa) e de níveis de pressão sonora (dB) [8] .....	6
Figura 2.3 – Espectro do audível de zonas de baixa frequência (esquerda) para altas frequências (direita). A sensibilidade varia com a intensidade do som. A curva exterior delimita os limites de audição, enquanto que as curvas interiores mostram a gama de frequências e intensidades para música e palavra. [12] .....	7
Figura 2.4 – Curvas de ponderação A, B, C e D. [13].....	8
Figura 2.5 – Comportamento em frequência dos três tipos de materiais/sistemas absorventes. [4,18]	10
Figura 2.6 – Exemplo de materiais porosos/fibrosos. a) aglomerado de cortiça; [19] b) poliuretano expandido; [20] c) lã de rocha. [21] .....	11
Figura 2.7 – Ressonador agrupado. [22] .....	12
Figura 2.8 – Ondas diretas e refletidas. [23] .....	13
Figura 2.9 – Curvas de decaimento para medição do tempo de reverberação. No caso A, o ruído de fundo não interfere, sendo possível detetar o decaimento de 60 dB. No caso B, já não é possível devido ao ruído de fundo, sendo que se faz uma extrapolação. [4] ..	13
Figura 2.10 – Propagação do ruído entre espaços contíguos por via direta (TD) e marginal (TM). [28] .....	16
Figura 2.11 – Transmissão de ruídos de condução aérea. [4] .....	17
Figura 2.12 – Curva de Referência normativa (CR) para ruídos de condução aérea. [29] .....	18
Figura 2.13 – Transmissão de ruídos de percussão. [4].....	19
Figura 2.14 – Curva de Referência normativa (CR) para ruídos de percussão. [4,30] ...	20
Figura 2.15 – Exemplo de intervenção de pavimentos para melhoria a isolamento a ruídos de percussão. À esquerda, pavimento existente, à direita solução melhorada (adaptado de [31]).....	20
Figura 2.16 – Contornos da emissão da palavra no plano horizontal. [33]. .....	21
Figura 3.1 – Classificação de leitura entre alunos em salas que confrontam uma linha ferroviária de cota elevada, e alunos de salas com menor ruído exterior. (adaptado de [44]).....	26
Figura 3.2 – Desempenho dos alunos sujeitos a diferentes níveis de ruído. Alunos expostos a níveis inferiores, obtém melhores resultados. (adaptado de [1]) ..	27
Figura 3.3 – Comportamento do $L_{eq}$ (nível sonoro contínuo equivalente) da gama de frequência dos 12,5 aos 12500 Hz na escola ruidosa do estudo de Silva <i>et al.</i> Como se verifica pela linha a verde, a voz do professor é ajustada em função do ruído de fundo (preto). (adaptado de [53]) .....	29
Figura 3.4 – Planta da sala de aula. (adaptado de [70]).....	32
Figura 3.5 – Tempo de reverberação estimado e medido das salas de aula. [69].....	33
Figura 3.6 – Coeficientes de absorção sonora ( $\alpha_s$ ) dos diferentes materiais de desperdício (CC – Copos de café; CCF – Copos de café furados na base; TO – Tabuleiros para ovos; E – Espuma de colchões de retoma), em função da frequência. (adaptado de [22]) ...	34

Figura 4.1 – Maus exemplos de soluções de placa de gesso cartonado a boas soluções com duas camadas de gesso cartonado, e fibra de vidro como isolamento no interior, à esquerda. À direita, localizações da porta, onde a) e b) são boas posições, enquanto c) e d) não, devido ao caminho curto entre salas. (adaptado de [74]) .....	44
Figura 5.1 – Fachada da Escola Secundária Serafim Leite. [fotografia do autor].....	52
Figura 5.2 – Fotografia aérea da Escola Secundária Serafim Leite. Orientação Norte-Sul. [fotografia do autor].....	52
Figura 5.3 – Fotografia aérea da Escola Secundária Serafim Leite- Orientação Sul-Norte [fotografia do autor].....	53
Figura 5.4 – Disposição da sala 9 da Escola Secundária Serafim Leite. [fotografia do autor] .....	54
Figura 5.5 – Disposição da sala 9 da Escola Secundária Serafim Leite. [fotografia do autor] .....	54
Figura 5.6 – Disposição da sala 9 da Escola Secundária Serafim Leite. [fotografia do autor] .....	54
Figura 5.7 – Disposição da cantina da Escola Secundária Serafim Leite. [fotografia do autor] .....	55
Figura 5.8 – Disposição da cantina da Escola Secundária Serafim Leite. [fotografia do autor] .....	55
Figura 5.9 – Ginásio da Escola Secundária Serafim Leite. [fotografia do autor] .....	56
Figura 5.10 – Ginásio da Escola Secundária Serafim Leite, aquando da medição do tempo de reverberação. [fotografia do autor] .....	56
Figura 6.1 – Esquema sem escala da posição da fonte sonora (FS) e dos pontos de medição (P1, P2 e P3) para determinação do tempo de reverberação na Sala 9 da Escola Secundária Serafim Leite. 58	
Figura 6.2 – Esquema sem escala da posição da fonte sonora (FS) e dos pontos de medição (P1, P2 e P3) para determinação do tempo de reverberação na Cantina da Escola Secundária Serafim Leite.58	
Figura 6.3 – Esquema sem escala da posição da fonte sonora (FS) e dos pontos de medição (P1, P2, P3 e P4) para determinação do tempo de reverberação no Ginásio da Escola Secundária Serafim Leite. ....	59
Figura 6.4 – Valores de tempo de reverberação por banda de frequência de 1/3 de oitava dos três espaços letivos da ESSL analisados.....	63
Figura 6.5 – Valores de tempo de reverberação por banda de frequência de oitava dos três espaços letivos da ESSL analisados. ....	63
Figura 6.6 – Valores de tempos de reverberação em banda de frequência de 1/3 de oitava na Sala 9 e respetiva imposição do RRAE.....	65
Figura 6.7 – Valores de tempos de reverberação em banda de frequência de 1/3 de oitava na Cantina e respetiva imposição do RRAE.....	65
Figura 6.8 – Valores de tempos de reverberação em banda de frequência de 1/3 de oitava na Ginásio e respetiva imposição do RRAE.....	66
Figura 6.9 e 6.10 – <i>Brüel &amp; Kjær</i> , modelo 4224 e <i>Brüel &amp; Kjær</i> , modelo 2260, usado nas medições. [fotografias do autor] .....	66
Figura 6.11 – Esquema sem escala da posição da fonte sonora (FS1 e FS2) e dos pontos de medição (P1, P2, P3, P4 e P5) no compartimento emissor (sala 8, à direita) assim como posição dos pontos de	

medição (P'1, P'2, P'3, P'4 e P'5) no compartimento recetor (sala 9, à esquerda) para obtenção dos níveis de pressão sonora para determinação do isolamento sonoro a ruídos de condução aérea. ....	67
Figura 6.12 – Disposição Sala 8 da Escola Secundária Serafim Leite. [fotografia do autor]. ....	67
Figura 6.13 – Corredor de acesso à sala 9. [fotografia do autor] .....	68
Figura 6.14 – Esquema sem escala da posição da fonte sonora (FS1 e FS2) e dos pontos de medição (P1, P2 e P3, P4) no compartimento emissor (corredor) assim como posição dos pontos de medição (P'1, P'2, P'3, P'4 e P'5) para obtenção dos níveis de pressão sonora para determinação do isolamento sonoro a ruídos de condução aérea .....	68
Figura 6.15 – Isolamento sonoro a ruídos de condução aérea padronizado, $D_{nT}$ (dB), por banda de frequência de 1/3 de oitava em duas paredes da ESSL.....	70
Figura 6.16 – Máquina de impactos normalizada <i>Brüel &amp; Kjær</i> . [fotografia do autor]. ....	71
Figura 6.17 – Disposição da sala 16 da Escola Secundária Serafim Leite [fotografia do autor] .....	72
Figura 6.18 – Esquema sem escala da posição dos pontos P1, P2, P3, P4 para determinação dos níveis de pressão sonora para a determinação do isolamento sonoro a ruídos de percussão na Sala 972	
Figura 6.19 – Esquema sem escala das diversas posições da máquina de percussão normalizada (MPN1, MPN2, MPN3 e MPN4) na sala 16. ....	73
Figura 6.20 – $L_{nT}$ (dB) por banda de frequência de 1/3 de oitava para a laje entre a sala 9 e a sala 16 da Escola Secundária Serafim Leite. ....	74
Figura 6.21 – Esquema sem escala da localização da fonte sonora (FS) e dos pontos de medição do RASTI (P1, P2, P3 e P4) na sala 9.....	75
Figura 6.22 e 6.23 – À esquerda, transmissor <i>Brüel &amp; Kjær</i> modelo 4225, e à direita o recetor <i>Brüel &amp; Kjær</i> modelo 4419 para medição de RASTI [fotografias do autor] ...	76
Figura 6.24 – Valores de RASTI da Sala 9, com as posições de medição dos valores por ordem crescente de distância à fonte.....	77
Figura 6.25 – Forma esquemática de linhas de igual RASTI para a Sala 9 da Escola Secundária Serafim Leite. (esquema sem escala).....	77
Figura 7.1 – Exemplo de aplicação de <i>baffles</i> em ginásio [96].....	82
Figura 7.2 – Detalhe das camadas que constituem o <i>BASWAphon</i> . (1 – Camada de suporte, constituída por lâ mineral; 2 – Camada de base, é a camada para os acabamentos <i>Fine</i> e <i>Base</i> ; 3 – Segunda camada, ou segunda demão, alisada à mão para um acabamento suave). [97].....	83
Figura 7.3 – Variação dos valores do tempo de reverberação em função de cada hipótese de material acústico a aplicar na Sala 9 da ESSL, e respetiva imposição legal máxima do RRAE.....	90
Figura 7.4 – Variação dos valores do tempo de reverberação em função de cada hipótese de material acústico a aplicar na Cantina da ESSL, e respetiva imposição legal máxima do RRAE. ....	92
Figura 7.5 – Variação dos valores do tempo de reverberação em função de cada hipótese de material acústico a aplicar no Ginásio da ESSL, e respetiva imposição legal máxima do RRAE.....	94



## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 – Velocidade propagação do som em diferentes meios e materiais [7] .....	4
Quadro 2.2 - Bandas de frequência de 1/3 oitava mais utilizados em Acústica de Edifícios [13] .....	8
Quadro 2.3 - Valores numéricos de ponderação da curva A para a banda de 1/1 oitava de frequência na gama do audível. [14].....	8
Quadro 2.4 - Absorção sonora do ar (m-1) em função da humidade relativa (valor por defeito deverá ser de 60%). [4] ..	15
Quadro 2.5 - Exemplo de absorções sonoras localizadas, $A_j$ . [4].....	15
Quadro 2.6 - Valores de tempos de reverberação médios (500-1k Hz) ideais para espaços em função do uso. [4].....	16
Quadro 2.7 – Quadro resumo da variabilidade da emissão da voz entre vogais e consoantes. [4,33]	22
Quadro 2.8 – Quadro auxiliar do método de cálculo de AI. [4] .....	22
Quadro 2.9 – Grau de inteligibilidade em função do AI. [4] .....	23
Quadro 2.10 – Valores de SIL para o qual a comunicação da palavra é perceptível, de acordo com a distância. (M: Masculino; F: Feminino). [4] .....	23
Quadro 2.11 – Valores para método de obtenção do AC. [4].....	24
Quadro 2.12 – Tabela de conversão RASTI da Norma IEC 268-16. [18].....	24
Quadro 3.1. – Tempos de Reverberação $T^*$ que maximizam a inteligibilidade da palavra para vários volumes de sala de aula e para cinco $L_n-L_{sp1m}$ ( $L_n$ - nível sonoro do ruído de fundo; $L_{sp1m}$ – nível sonoro a um metro à frente do orador). Todos os valores do tempo de reverberação são para a banda de frequência de 1000 Hz. (adaptado de [48]).....	28
Quadro 3.2 – Valores de tempo de reverberação sugerido por diversos autores, para ginásios escolares.....	31
Quadro 3.3 – Custo e desempenho de dois tipos de tetos acústicos para uma sala de aula nos E.U.A. em 2001 (30 alunos, 100 m <sup>2</sup> ). (adaptado de [68]).....	32
Quadro 3.4 – Propriedades físicas da sala de aula na Turquia em 2001. (adaptado de [69]) .....	33
Quadro 3.5 – Tempos de Reverberação após tratamento da sala. (adaptado de [69]) .....	33
Quadro 3.6 – Valores do $TR_{médio}$ (500-2k Hz) para as situações SV1 (sala vazia, sem intervenção) e SV2 (sala vazia com painel termo acústico e um resíduo têxtil proveniente da reciclagem de pneus aplicados na face interior da parede de fachada) e limite regulamentar em Portugal. [adaptado de [22]].....	34
Quadro 3.7 – Valores do $TR_{médio}$ (500-2k Hz) para todos os ensaios realizados com materiais reciclados em sala de aula. Em que a) na parte superior das paredes de fundo; b) encostadas na longitudinal à base das paredes; c) sobre revestimento de piso. (adaptado de [22]).....	35
Quadro 4.1 – Valores mínimos do índice de isolamento sonoro a ruídos de condução aérea ( $DnT, w$ ) para elementos construtivos interiores em edifícios escolares segundo o RRAE. (adaptado do quadro 7.10 do RRAE) [71] .....	38

Quadro 4.2 – Valores máximo do índice de isolamento sonoro a ruídos de percussão ( $L'_{nT, w}$ ) em edifícios escolares segundo o RRAE. (adaptado do quadro 7.10 do RRAE) [71] .....	38
Quadro 4.3 – Valores máximo do índice do tempo de reverberação médio (500, 1k e 2k Hz) em edifícios escolares. (adaptado do quadro 7.10 do RRAE) [71] .....	39
Quadro 4.4 – Valores de tempo de reverberação para diversos tipos de salas em edifícios escolares. (adaptada da tabela 6 do Building Bulletin 93 de 2015) [72].....	40
Quadro 4.5 – Valores de tempo de reverberação para ginásios e piscinas. (adaptada da tabela 7 do Building Bulletin 93 de 2015) [72].....	40
Quadro 4.6 – Classificação de diversos salas para o propósito do isolamento a sons de condução aérea em edifícios escolares reabilitados. (adaptado da tabela 1 do Building Bulletin 93 de 2015) [72] .....	41
Quadro 4.7 – Valores mínimos do $D_{nT, w}$ para edifícios escolares reabilitados. (adaptado da tabela 3b do Building Bulletin 93 de 2015) [72].....	42
Quadro 4.8 – Valores do $L'_{nT, w}$ para edifícios escolares remodelados. (adaptado da tabela 5 do Building Bulletin 93 de 2015) [72].....	42
Quadro 4.9 – Valores de STI ( <i>Speech Transmission Index</i> ) em espaços <i>open-plan</i> . (adaptado da tabela 8 do Building Bulletin 93 de 2015) [72].....	43
Quadro 4.10 – Tempos de reverberação de acordo com a norma ANSI/ASA S12.60. (adaptado de [75]).....	44
Quadro 4.11 – <i>Sound Transmission Class</i> mínimo requerido para paredes simples ou compostas e conjuntos piso/teto que separam salas de acordo com a norma ANSI/ASA S12.60. (adaptado de [75])	45
Quadro 4.12 – Valores mínimos de STC entre espaços de acordo com a norma ANSI/ASA S12.60. (adaptado de [75]) .....	45
Quadro 4.13 – Valores mínimos de IIC de acordo com a norma ANSI/ASA S12.60.(adaptado de [75]).....	45
Quadro 4.14 – Valores de $D_{nt,A}$ de acordo com o DB-HR. (adaptado de [78]) .....	46
Quadro 4.15 – Valores máximos de $L'_{nT,w}$ de acordo com o DB-HR. (adaptado de [78]) .....	46
Quadro 4.16 – Tempos de reverberação máximos de acordo com o DB-HR. (adaptado de [78]).....	46
Quadro 4.17 – Limite de níveis sonoros em diversos espaços escolares brasileiros de acordo com a NBR 10152. (adaptado de [81]).....	47
Quadro 4.18 – Tempos de reverberação máximo de acordo com a AAAC: <i>Guideline for Educational Facilities</i> V2.0. (adaptado de [80]).....	48
Quadro 4.19 – Requisitos de isolamento a ruídos de condução aérea e sons de percussão de acordo com a AAAC: <i>Guideline for Educational Facilities</i> V2.0. (adaptado de [84]).....	48
Quadro 4.20 – Valores mínimos de isolamento a ruídos de condução aérea, $D_w$ de acordo com a AAAC: <i>Guideline for Educational Facilities</i> V2.0. (adaptado de [84]) .....	49
Quadro 4.21 – Valores máximos de isolamento a ruídos de percussão, $L_{nT,w}$ de acordo com a AAAC: <i>Guideline for Educational Facilities</i> V2.0. (adaptado de [84]) .....	49

Quadro 6.1 – Tempo de reverberação para a Sala 9 da Escola Secundária Dr. Serafim Leite. ....	60
Quadro 6.2 – Tempo de reverberação para a Cantina da Escola Secundária Dr. Serafim Leite. ....	61
Quadro 6.3 – Tempo de reverberação para o Ginásio da Escola Secundária Dr. Serafim Leite. ....	62
Quadro 6.4 – Quadro resumo do cumprimento do tempo de reverberação do RRAE. ....	64
Quadro 6.5 – Níveis de pressão sonora médios na sala 8 (emissora) e 9 (recetora) para determinação do isolamento sonoro a ruídos de condução aérea. ....	69
Quadro 6.6 – Níveis de pressão sonora médios no corredor (emissor) e na sala 9 (recetor) para determinação do isolamento sonoro a ruídos de condução aérea. ....	69
Quadro 6.7 – Resultado do índice de isolamento sonoro a ruídos de condução aérea, $D_{nT,w}$ , entre salas. ....	69
Quadro 6.8 – Quadro resumo do cumprimento do $D_{nT,w}$ do RRAE. ....	71
Quadro 6.9 – Níveis de pressão sonora médios na sala 9 para determinação do isolamento sonoro a ruídos de percussão. ....	73
Quadro 6.10 – Resultado do índice de isolamento sonoro a ruídos de percussão, $L'_{nt,w}$ . ....	73
Quadro 6.11 – Quadro resumo do cumprimento do $L'_{nT,w}$ do RRAE. ....	74
Quadro 6.12 – Valores das medições RASTI para a Sala 9. ....	76
Quadro 7.1 – Quadro de comparação entre a Escola Secundária de Gondomar (c/ tratamento acústico) e a Escola Secundária Serafim Leite (s/ tratamento acústico). ....	80
Quadro 7.2 – Quadro de comparação de $R_w$ de vidros simples, vidros duplos comuns e vidros acústicos da ISOLAR AKUSTEX®. [95,4]. ....	82
Quadro 7.3 – Coeficientes de absorção sonora dos materiais e do teto dos espaços da ESSL. ....	84
Quadro 7.4 – Valores do tempo de reverberação por banda de frequência e previsto (500-2k Hz) em função do material aplicado na totalidade da área de teto na Sala 9 (Área de teto = 54 m <sup>2</sup> ; V = 170 m <sup>3</sup> ). ....	86
Quadro 7.5 – Valores do tempo de reverberação por banda de frequência e previsto (500-2k Hz) em função do material aplicado na totalidade da área de teto na Cantina. (Área de teto=172 m <sup>2</sup> ; V=532 m <sup>3</sup> ). ....	87
Quadro 7.6 – Valores do tempo de reverberação por banda de frequência e previsto (500-2k Hz) em função do material aplicado na totalidade da área de teto no Ginásio (Área de teto = 623 m <sup>2</sup> ; V = 4630 m <sup>3</sup> ). ....	88
Quadro 7.7 – Estimativa orçamental por material acústico para a Sala 9 da ESSL (Área de teto = 54 m <sup>2</sup> ). ....	89
Quadro 7.8 – Estimativa orçamental por material acústico para a Cantina da ESSL (Área de teto = 172 m <sup>2</sup> ). ....	91
Quadro 7.9 – Estimativa orçamental por material acústico para o Ginásio da ESSL (Área de teto = 623 m <sup>2</sup> ). ....	93
Quadro 7.10 – Quadro resumo das soluções com melhor desempenho e mais económicas a aplicar, assim como a escolha ideal do material a aplicar nos espaços da ESSL. ....	95

Quadro 8.1 – Quadro resumo dos parâmetros medidos na Escola Secundária Serafim Leite. .... 98

## SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

A – Absorção sonora ( $m^2$ )

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

AAAC – *Association Australasian Acoustical Consultants*

AC – *Articulation Class*

$A_j$  – Absorção sonora localizada ( $m^2$ )

AI – *Articulation Index*

ANSI – *American National Standards Institute*

ASA – *Acoustical Society of America*

ASHA – *American Speech, Language, Hearing Association*

BB93 – *Building Bulletin 93*

c – Celeridade (m/s)

cm – Centímetros (unidade de medida)

CR – Curva de referência

d – Largura da caixa de ar

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

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

dB – Decibel (unidade de medida)

DB – *Documento Básico*

DIN – *Deutsches Institut für Normung*

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

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

e – Espessura (cm)

ESG – Escola Secundária de Gondomar

ESSL – Escola Secundária Serafim Leite

f – Frequência (Hz)

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

$f_1$  – Limite superior de frequência de uma banda (Hz)

$f_2$  – Limite superior de frequência de uma banda (Hz)

HR – Humidade relativa

I – Incerteza

I – Intensidade sonora ( $W/m^2$ )

- $I_0$  – Intensidade sonora de referência ( $W/m^2$ )
- IIC – *Impact Insulation Class*
- l – Comprimento de cavidade (m)
- $L'_{nT}$  – Isolamento sonoro a ruídos de percussão, padronizado (dB)
- $L'_{nT,w}$  – Índice isolamento sonoro a ruídos de percussão, padronizado (dB)
- $LA_{eq}$  – Nível sonoro contínuo equivalente, ponderado em A (dB)
- $L_{Ar}$  – Avaliação de ruídos de equipamentos (dB)
- $L_{eq}$  – Nível de pressão sonora contínua equivalente (dB)
- $L_p$  – Nível de pressão sonora (dB)
- $L_{sp1m}$  – Nível sonoro a um metro à frente do orador (dB)
- NC – *Noise Criteria*
- NRC – *Noise Reduction Coefficient*
- m – Absorção sonora do ar em função da HR ( $m^{-1}$ )
- MRT – *Modified Rhyming Tests*
- P – Percentagem de área perfurada (%)
- p – Pressão sonora (Pa)
- $p_0$  – Pressão de referência (Pa)
- PBw – *Phonetically Balanced Words*
- Pa – Pascal (unidade de medida)
- r – Raio do orifício de entrada (m)  
– Raio de cada perfuração (cm)
- R – Redução sonora (dB)
- RASTI – *Rapid Speech Transmission Index*
- RGR – Regulamento Geral do Ruído
- RMS – *Root Mean Square*
- RRAE – Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios
- $R_w$  – Índice de redução ou atenuação acústica (dB)
- s – Segundo (unidade de medida)
- STC – *Sound Transmission Class*
- STI – *Speech Transmission Index*
- T – Temperatura do meio ( $^{\circ}K$ )
- $T_0$  – Tempo de reverberação de referência (s)
- TR – Tempo de Reverberação

V – Volume do compartimento ( $m^3$ )

– Volume de cavidade interior ( $m^3$ )

W – Potência sonora (W)

$W_0$  – Potência sonora de referência (W)

$\alpha$  – Coeficiente de absorção sonora do material

$\lambda$  – Comprimento de onda (m)

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

$\theta$  – Temperatura do ar ( $^{\circ}C$ )

$^{\circ}C$  – Grau Celsius (unidade de medida)



# 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1. ENQUADRAMENTO E OBJETIVOS

O Homem procura insistentemente o conforto. Em edifícios, o ser humano faz exatamente o mesmo. Todos os espaços visam, cada vez mais e com maior exigência, uma melhor qualidade térmica e acústica, maior salubridade, com aspeto visual apelativo e até segurança. Nas escolas, o mesmo acontece. Nos últimos anos em Portugal, muitos edifícios escolares, pela mão da “Parque Escolar, E.P.E.”, têm vindo a ser intervencionados e modernizados, dando a todos os alunos e corpo docente melhores condições para o sucesso académico dos estudantes. No entanto, muitas outras escolas ainda não sofreram nenhuma intervenção nesse âmbito.

É crescente a preocupação com a acústica nos edifícios. Em escolas, isto é da maior importância, visto que a voz continua a ser o maior canal transmissor de conhecimento, tanto que 60% das atividades numa sala de aula são pela palavra. [1] Em salas acusticamente pobres, com excesso de ruído de fundo e reverberação, o conhecimento pode não chegar devidamente aos alunos, porque todos estes fatores influenciam a inteligibilidade da palavra “que pode ser definida pela clareza do discurso do locutor e a compreensão do ouvinte ao mesmo.” [2]

Nos anos 80, S. Cohen *et al.*, fizeram um estudo em que provaram que alunos de uma escola com salas acusticamente menos adequadas, além de demorarem mais tempo a resolver tarefas, também eram mais suscetíveis a desistir dessas tarefas. Os autores também concluíram que alunos do primeiro ciclo de aprendizagem, constantemente expostos a salas ruidosas, tinham pior aproveitamento escolar mesmo que fossem avaliados em salas de aula com melhor qualidade acústica.[3] Este facto sugere que a constante exposição ao ruído pode ter efeitos na aprendizagem dos alunos a longo prazo. A redução da exposição ao ruído poderá ser obtida através de correções acústicas do espaço, para que os sons aí emitidos sejam perceptíveis, ou através da instalação de isolamento sonoro a interferência de ruído exterior.

Mas o conforto acústico num edifício escolar vai além das salas de aula. Assim, todos os outros espaços escolares devem ser estudados, analisados e corrigidos tendo em conta as suas necessidades e as atividades que aí decorrem. Espaços como refeitórios, ginásios e bibliotecas, que são espaços de grande importância do dia-a-dia dos jovens estudantes e, portanto, também merecem e devem ser analisados.

Desta forma, tendo por base os valores de parâmetros acústicos obtidos por medições *in situ* nas salas de aulas e em outros diversos espaços da escola em estudo, o objetivo passará por verificar o seu cumprimento legal e sugerir de forma muito sintética soluções de correção relativamente à qualidade acús-

tica e talvez, num desenvolvimento futuro, com as novas medições comparar a melhoria dos espaços após aplicação das ditas propostas de correção.

O objeto de estudo será a Escola Secundária Serafim Leite (ESSL), localizada em São João da Madeira. Escola Industrial e Comercial aquando da sua formação nos anos de 1970, que se transformaria em Escola Secundária no ano letivo de 1977/1978. A escola sofreu pequenas renovações e extensões desde a sua construção, até ao formato atual. Constituída pelo edifício principal, onde se apresentam a maior parte das salas de aulas nos seus 4 pisos, um edifício onde se encontra o ginásio que se encontra no piso superior à cantina, e outros pequenos blocos de aulas. Num desses blocos de aulas, composto por uma série de oficinas de trabalho onde são lecionadas maior parte das aulas dos cursos profissionais. Em 2008 a escola teve a sua última grande alteração, quando foi inaugurado no espaço central, a nova biblioteca e auditório da escola assim como um polivalente e um novo bar de serventia a alunos e docentes.

Desse modo a Escola Secundária Serafim Leite é um objeto de estudo acústico (e não só) interessante por ter edifícios com diferentes soluções construtivas, de anos diferentes e que sofreram alterações ao longo da sua existência: por um lado as oficinas, parte mais antiga e menos tratada acusticamente, onde são lecionadas quase em exclusivo as aulas dos cursos profissionais e o bloco principal, um pouco melhor conservado e mais moderno, onde normalmente ocorrem as aulas dos alunos de cursos científico-humanísticos.

## 1.2. ESTRUTURA DA TESE

Este trabalho encontra-se dividido em oito capítulos. Neste Capítulo 1 é feita uma breve introdução da problemática e são expostos os objetivos deste trabalho; no Capítulo 2 são descritos os diversos conceitos acústicos necessários para melhor compreensão do tema; no Capítulo 3, o Estado da Arte, é demonstrado em que ponto se encontra o estado atual de conhecimento sobre temáticas de importância a esta dissertação; no Capítulo 4 é apresentada a legislação em vigor em Portugal à data da execução desta dissertação, assim como a legislação noutros países, europeus, do continente americano e ainda da Océania; no Capítulo 5 é feita uma caracterização da escola que é alvo de estudo deste trabalho, assim como uma exposição dos espaços em que foram analisados parâmetros acústicos; no Capítulo 6 são apresentadas as metodologias usadas para as medições, os resultados das medições efetuadas *in situ*, assim como a interpretação e a discussão dos resultados e o seu enquadramento legal em Portugal; no Capítulo 7 é feita uma comparação com uma escola intervencionada pelo “Parque Escolar E.P.E.”, assim como uma breve sugestão de como melhorar os espaços/elementos que necessitem de ser intervencionados aos olhos da legislação; finalmente, no Capítulo 8 são expostas as conclusões de toda esta dissertação e indicados possíveis desenvolvimentos futuros.

# 2

## CONCEITOS E DEFINIÇÕES

*“Era uma vez... um ponto onde se altera a pressão” [4]*

### 2.1. CONCEITOS TEÓRICOS BÁSICOS

#### 2.1.1. O SOM

O que habitualmente é conhecido por som, não passa de um estímulo no cérebro. Esse estímulo é resultado de uma variação de pressão no meio envolvente (que se propaga em todas as direções sobre a forma de ondas) que é captado pelo sistema auditivo. O meio envolvente, que sendo habitualmente o ar, pode ser um e qualquer outro meio elástico (como água, materiais sólidos, etc.), independentemente do seu estado físico.

O som pode, no entanto, ser subjetivo de acordo de quem o ouve. Dependendo do ouvinte ou recetor, e das circunstâncias em que encontra, este pode interpretar a variação de pressão no meio como desagradável, sendo essa pressão entendida como ruído e não som. [4]

#### 2.1.2. PRESSÃO

Um som/ruído é causado pela variação de pressão no meio de propagação das ondas (no âmbito de toda a dissertação, o ar). Essa variação de pressão é propagada devido à colisão entre as partículas de ar sucessivas. Se uma partícula se move da sua posição original, forças elásticas do ar tendem a restaurar à sua posição inicial. Devido à inércia, esta ultrapassa a posição de repouso, fazendo com que haja forças elásticas na posição oposta, e assim sucessivamente. Com isto, a propagação pode ser representada por uma série de compressões e rarefações no meio, como se pode verificar na figura 2.1. [4,5]

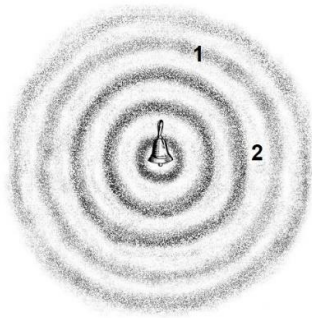


Figura 2.1 – Propagação do som. [6]

1– Zona de compressões; 2 – Zona de rarefações.

Na medição da variação de pressão provocada pelas ondas sonoras, é sempre tido como referência a pressão atmosférica normal,  $P_{at}$ , que no planeta Terra ronda os  $10^5$  Pa (cerca de 101.400 Pa). São variações de pressão em torno deste valor que o ouvido humano consegue captar e entender como som/ruído. Estas variações de pressão são muito pequenas, sendo que um ruído muito intenso, como o funcionamento de um avião, não cria uma variação maior que 10 Pa.

A celeridade, ou velocidade de propagação das ondas (ou da variação de pressão) no ar, varia com a temperatura de acordo com a expressão (2.1):

$$c = 20,045\sqrt{T} \quad (2.1.)$$

Em que  $T (K) = 273,15 + \theta (^\circ C)$

Quadro 2.1 – Velocidade propagação do som em diferentes meios e materiais [7]

Meio	Velocidade (m/s)
Ar ( $0^\circ C$ )	331
Ar ( $20^\circ C$ )	343
Água ( $0^\circ C$ )	1402
Água ( $0^\circ C$ )	1482
Alumínio	6420
Aço	5941
Granito	6000

A variação de pressão é uma variável acústica que tem alterações temporais assinaláveis. Assim, essas variáveis são determinadas pela medição de valores eficazes, ou RMS (*root mean square*). Esses valores são os que interessam avaliar, e são aqueles que os sonómetros determinam. A pressão eficaz é definida pela expressão (2.2).

$$p_{ef}^2 = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} p^2(t) dt \quad (2.2.)$$

Para sons puros (constituídos apenas por uma frequência) a expressão pode ser simplificada, relacionando a pressão eficaz com a pressão máxima, como na expressão seguinte (2.3). [4]

$$p_{eficaz} = \frac{P_{máxima}}{\sqrt{2}} \approx 0,71P_{máxima} \quad (2.3.)$$

### 2.1.3. INTENSIDADE E POTÊNCIA SONORA

A intensidade ( $I$ ) é uma medida vetorial, definida pela quantidade média de energia que atravessa, por segundo, uma área de um metro quadrado, expressa em  $W/m^2$ . Ao contrário da pressão sonora ( $p$ ), a intensidade permite avaliar a componente direcional do som passando a ser representado por uma grandeza vetorial. A potência sonora ( $W$ ) caracteriza a fonte e é dada pela energia total que atravessa uma esfera fictícia centrada na fonte. Estas três características do som são relacionadas através da expressão (2.4).

$$I = \frac{W}{4\pi r^2} = \frac{p^2}{\rho c} \quad (2.4.)$$

Onde:

$I$ – intensidade sonora ( $W/m^2$ );	$p$ – pressão sonora (Pa);
$W$ – potência sonora (W);	$\rho$ – massa volúmica (ar $\approx 1,2 \text{ kg/m}^3$ );
$r$ – distância (m);	$c$ – celeridade ( $\approx 340 \text{ m/s}$ ).

### 2.1.4. NÍVEIS DE PRESSÃO

O sistema auditivo humano não é sensível do mesmo modo a todas as variações de pressão, sendo que o limiar de audição, que é o valor mínimo da variação de pressão, situa-se nos  $10^{-5}$  Pa. No extremo oposto, o limiar da dor, a partir do qual a sensação auditiva passa de ruído a dor, dá-se com uma variação de pressão superior a 100 Pa. A escala usada para avaliar as pressões sonoras é o *decibel* (dB), que, sendo uma escala logarítmica, é uma escala que traduz melhor a forma que o ouvido responde a estímulos, ainda com a vantagem de não usar valores tão dispares (cerca de  $10^7$ ) entre o limiar da audição e da dor como representado na figura 2.2. A conversão de escalas para o nível de pressão sonora ( $L_p$ ) é feita usando como referência o valor  $2 \times 10^{-5}$  Pa segundo as seguintes expressões: (2.5.) e (2.6.)

$$L_p = 20 \log \left( \frac{p}{p_0} \right) \text{ ou } L_p = 10 \log \left( \frac{p^2}{p_0^2} \right) \quad (2.5, 2.6.)$$

Onde:

$L_p$ – nível de pressão sonora (dB);
$p$ – pressão sonora (Pa);
$p_0$ – pressão sonora de referência, $2 \times 10^{-5}$ Pa.

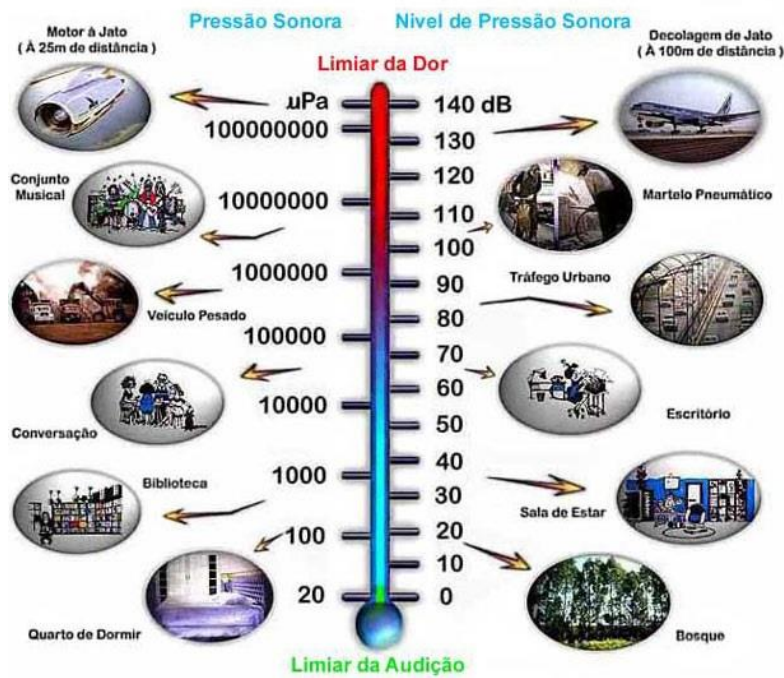


Figura 2.2 – Escala de pressão sonora (Pa) e de níveis de pressão sonora (dB) [8]

É possível a adição de níveis de pressão sonora, que se faz de acordo com a expressão (2.7.).

$$L_{soma} = 10 \log \left( \sum_{i=1}^N 10^{\frac{L_i}{10}} \right) \quad (2.7.)$$

Para além da pressão é também corrente caracterizar o fenómeno sonoro através da intensidade sonora, obtendo o nível de intensidade sonora ( $L_I$ ) como na expressão (2.8.) ou da mesma forma com a potência sonora obtendo o nível de potência sonora ( $L_W$ ) como na expressão (2.9.).

$$L_I = 10 \log \left( \frac{I}{I_0} \right) \quad (2.8.)$$

$$L_W = 10 \log \left( \frac{W}{W_0} \right) \quad (2.9.)$$

Onde:

$I$  – intensidade sonora ( $W/m^2$ );

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

$W$  – potência sonora (W);

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

## 2.1.5. FREQUÊNCIA

Outra característica importante na caracterização de um som é precisamente a frequência. Por um lado, os sons puros, são aqueles que possuem apenas uma frequência. No entanto, mas na generalidade dos casos, o som é composto por várias frequências, o chamado som complexo. Exemplos de sons completos são a música e o mais importante nesta dissertação, a palavra.

A frequência é o número de ocorrências das flutuações completas de pressão por segundo e é expressa em *hertz* (Hz). A sensibilidade humana encontra-se entre os 20 Hz (limiar audição) e os 20 kHz (limiar da dor), quando jovens e com audição normal, mas esta sensibilidade vai diminuindo com a idade e com outros fatores como a exposição regular a ruído mais intenso. Sons abaixo dos 20 Hz e não ouvidos pelo humano são denominados de *infra-sons* enquanto que os de frequência acima de 20 kHz são denominados de *ultra-sons*. [4,9,10,11]

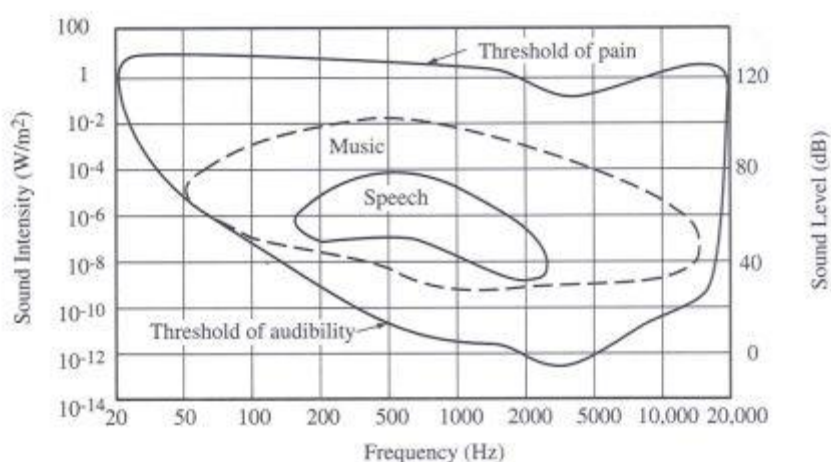


Figura 2.3 – Espectro do audível de zonas de baixa frequência (esquerda) para altas frequências (direita). A sensibilidade varia com a intensidade do som. A curva exterior delimita os limites de audição, enquanto que as curvas interiores mostram a gama de frequências e intensidades para música e palavra. [12]

Uma vez que existe uma grande gama de frequências audíveis pelo ser humano, e por isso de difícil análise, faz-se um agrupamento de frequência em intervalos normalizados, denominados de “bandas”. Uma banda é um agrupamento de frequências entre dois limites, inferior ( $f_1$ ) e superior ( $f_2$ ) (expressão 2.10.). O valor médio é denominado por frequência central ( $f_0$ ) e dá o nome a cada banda de frequência. [4]

$$f_0 = \sqrt{f_1 f_2} \quad (2.10.)$$

Os valores das bandas de 1/1 oitava que estão normalizados para o domínio do audível são: 16, 31, 63, 125, 250, 500, 1k, 2k, 4k, 8k e 16k Hz. Já os valores de 1/3 oitava normalizados para o domínio do audível são centrados em: 20, 25, 31, 40, 50, 63, 80, 100, 125, 160, 200, 250, 315, 400, 500, 630, 800, 1k, 2k, 2500, 3150, 4k, 5k, 6300, 8k, 10k, 12500, 16k e 20k Hz. No entanto em acústica de edifícios só se utilizam habitualmente as 16 bandas de terço de oitava dos 100 aos 3150 Hz. Havendo exceções feitas para situações em laboratório (Quadro 2.2). [4]

Quadro 2.2 – Bandas de frequência de 1/3 oitava mais utilizados em Acústica de Edifícios. [13]

Frequência (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 3,15k

Além de o ser humano não ser capaz de distinguir pequenas variações em frequência, o ouvido humano, também não é sensível de igual forma às várias frequências do espectro, ao contrário de um microfone. O ouvido humano tem uma sensibilidade maior para frequências na zona dos 2300 aos 2800 Hz e menor para muito baixas frequências (abaixo dos 125 Hz), contudo esta sensibilidade também é dependente da intensidade sonora do próprio som. De modo a traduzir esta resposta não linear do ouvido, são introduzidos filtros nos aparelhos de captação, que corrigem os valores medidos através das curvas de ponderação. Existem quatro curvas de ponderação: *A*, *B*, *C* e *D* (figura 2.4), sendo a mais usada a curva *A* ou filtro *A*. No Quadro 2.3 estão indicados os valores da de correção para 1/1 oitava na gama do audível.

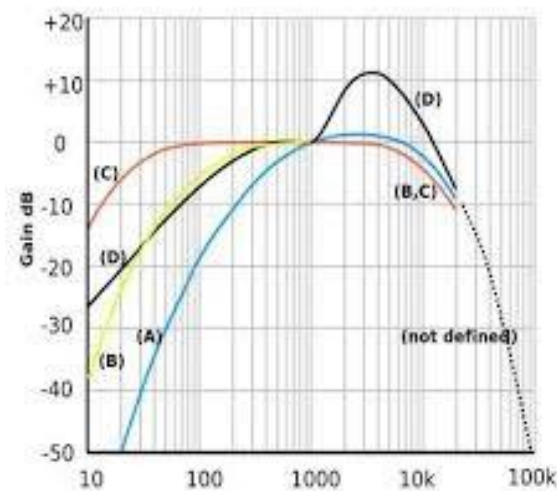


Figura 2.4 – Curvas de ponderação A, B, C e D. [13]

Quadro 2.3 – Valores numéricos de ponderação da curva *A* para a banda de 1/1 oitava de frequência na gama do audível. [14]

Frequência (Hz)	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k	16k
Filtro A (dB)	-26	-15,5	-8,5	-3	0	1	1	-1	-7

Um som pode também ser representado por apenas um valor global de nível sonoro, além do espectro de valores de níveis de pressão. Este valor é obtido através da soma logarítmica dos níveis de pressão sonora, ao qual normalmente se aplica um filtro, em que na maioria dos casos é o *A*.

Por vezes é necessário também uma análise do som, em função da sua duração. Isto porque, por vezes, é difícil caracterizar um evento sonoro se este tiver uma grande amplitude temporal. Nestes casos usa-se o nível de pressão sonora contínua equivalente,  $L_{eq}$ . Este indicador permite calcular o nível de pressão sonora, que se atuasse constante num intervalo de tempo, “produziria” a mesma energia do som constante que se pretende avaliar. Pode ser obtido através da expressão 2.11. [4]

$$L_{eq} = 10 \log \frac{1}{T} \int_0^T \left( \frac{p(t)}{p_0} \right)^2 dt \quad (2.11.)$$

Onde:

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

$p$  – pressão sonora (Pa);

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

$T$  – duração do som.

Se o fenómeno sonoro for composto por regimes uniformes, em que tanto o nível de pressão sonora como o tempo de cada um desses regimes é conhecido, pode-se recorrer à expressão 2.12.

$$L_{eq} = 10 \log \left[ \frac{1}{T} \sum_{i=1}^N t_i \cdot 10^{\frac{L_i}{10}} \right] \quad (2.12.)$$

## 2.2. ABSORÇÃO SONORA

### 2.2.1. A ABSORÇÃO SONORA

A absorção sonora é uma propriedade dos materiais. Esta propriedade é a relação existente entre a quantidade de energia sonora que é absorvida pelo material e aquela que nele incide, e o parâmetro que o permite quantificar é o coeficiente de absorção sonora ( $\alpha$ ).

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

Assim sendo, um material com um coeficiente de absorção sonora de 0,50, é capaz de absorver 50% da energia que nele incide. Com isto, rapidamente se percebe que, um material muito absorvente terá um  $\alpha$  perto de 1, ao contrário de um material muito refletor (como um pavimento de betão, p.ex.) que terá valores de  $\alpha$  perto de 0. [4,5]

A nível europeu existe uma norma, a EN ISO 11654, que é usada para calcular o coeficiente de absorção médio ( $\alpha_w$ ) dos materiais. [15] Esta norma só é possível após o uso da norma NP EN ISO 354 que é, no fundo, o método da câmara reverberante para o cálculo dos coeficientes de absorção sonora dos materiais, que se irá abordar no parágrafo seguinte. [16] É também corrente o parâmetro *NRC* (*noise reduction coefficient*), especialmente no continente Norte Americano, que se define como a média aritmética dos valores  $\alpha$  nas bandas de oitava dos 250 aos 2000 Hz, como é definido na ASTM C423-17. [17]

Existem dois métodos para determinar este coeficiente de absorção sonora: *método do tubo de ondas estacionárias* e o *método da câmara reverberante*. O primeiro método, apesar da vantagem de necessitar de pequenas amostras e necessitar de pequeno equipamento, tem a grande desvantagem da incidência na amostra do material apenas se dar na perpendicular sendo que no método da câmara reverberan-

te, a incidência na amostra dá-se através de todos os ângulos, simulando melhor e sendo mais aproximado com a realidade.

### 2.2.2. MATERIAIS ABSORVENTES E SISTEMAS

Os materiais podem ser divididos em três categorias diferentes de acordo com as suas características básicas e essencialmente, as gamas de frequência onde são mais eficazes (figura 2.5):

- Porosos e Fibrosos;
- Ressonadores;
- Membranas ou Membranas ressonantes.

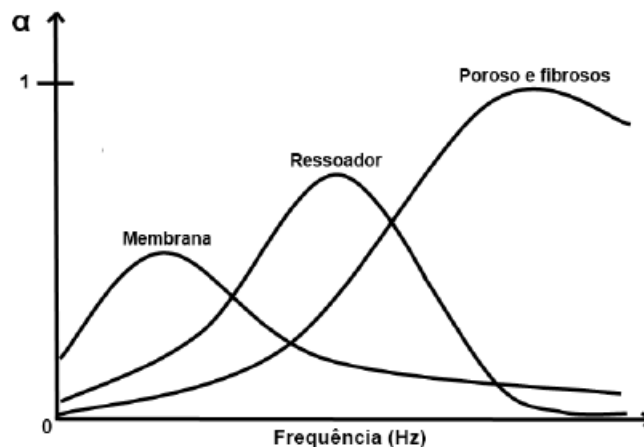


Figura 2.5 – Comportamento em frequência dos três tipos de materiais/sistemas absorventes. [4,18]

#### 2.2.2.1. Porosos e Fibrosos

Os materiais porosos e fibrosos são os materiais mais eficazes a altas frequências. O mecanismo de absorção sonora destes materiais baseia-se nos poros e interstícios do próprio material. Ou seja, uma onda incidindo no material, faz vibrar as fibras, transformando a energia sonora incidente em calor, fazendo dissipar o som. Estes materiais perdem a sua eficiência se pintados, isto porque, ao serem pintados, perdem parte da porosidade. Exemplos destes tipos de materiais são: [4,5]

- Tecidos e alcatifas;
- Massas porosas para projeção;
- Fibras minerais;
- Aglomerados de fibras de madeira;
- Aglomerados de cortiça.

Exemplos destes materiais podem ser vistos na Figura 2.6 que se apresenta a seguir.

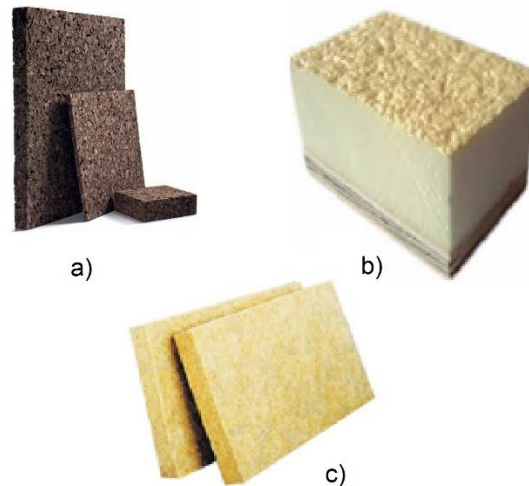


Figura 2.6 – Exemplo de materiais porosos/fibrosos. a) aglomerado de cortiça; [19] b) poliuretano expandido; [20] c) lã de rocha. [21]

#### 2.2.2.2. Ressonadores

Os ressoadores, também conhecidos como ressoadores de cavidade ou ressoadores de Helmholtz, são sistemas que têm melhor eficiência acústica para médias frequências. São constituídos por uma cavidade e paredes rígidas e com um pequeno orifício, apresentando uma forma semelhante a uma garrafa. A frequência de eficácia máxima pode ser calculada pela expressão seguinte: [4]

$$f = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{V(l+1,6 \times r)}} \quad (2.14.)$$

Onde:

- $c$  – celeridade do ar (m/s);
- $S$  – área do orifício de entrada (m<sup>2</sup>);
- $V$  – volume da cavidade interior (m<sup>3</sup>);
- $l$  – comprimento/profundidade da cavidade (m);
- $r$  – raio do orifício de entrada (m).

A forma mais comum de aplicação destes sistemas de absorção são os ressoadores agrupados (Figura 2.7). São criados simplesmente por painéis de metal ou madeira perfurados, criando um teto falso, e funcionando de forma similar aos ressoadores de cavidade, onde o ar na cavidade entra em vibração devido à onda sonora, perdendo energia e dissipando. [4]

$$f = \frac{10 \times c}{2\pi} \sqrt{\frac{P}{d(e+1,6 \times r)}} \quad (2.15.)$$

Onde:

$f$  – frequência de maior absorção sonora (Hz);

$c$  – celeridade do ar (m/s);

$P$  – percentagem de área perfurada (%);

$d$  – largura da caixa de ar (cm);

$e$  – espessura da placa perfurada (cm);

$r$  – raio de cada perfuração (cm).



Figura 2.7 – Ressonador agrupado. [22]

### 2.2.2.3. Membranas

As membranas, também conhecidas por painéis vibrantes, são sistemas com maior utilidade acústica para atuar em baixas frequências. Estes sistemas são painéis de pequena espessura que, atingidos por uma frente de onda, vibram, perdendo calor por fricção nas suas fibras quando o material entra em flexão. [4,5]

## 2.3. TEMPO DE REVERBERAÇÃO

### 2.3.1. DEFINIÇÃO

Como é sabido, e já mencionado no início do capítulo, as ondas sonoras propagam-se em todas as direções a partir da fonte/emissor. No meio exterior, o som propaga-se até que após perder toda a sua energia, se extingue. Mas, num ambiente fechado, existirão ondas sonoras diretas. Além dessas haverá outras refletidas, vindas dos limites do espaço fechado. As ondas diretas são as primeiras a chegar ao recetor e com maior nível de pressão sonora, devido à menor distância percorrida. De seguida chegam as ondas refletidas, oriundas dos diversos planos do espaço. [4,5]

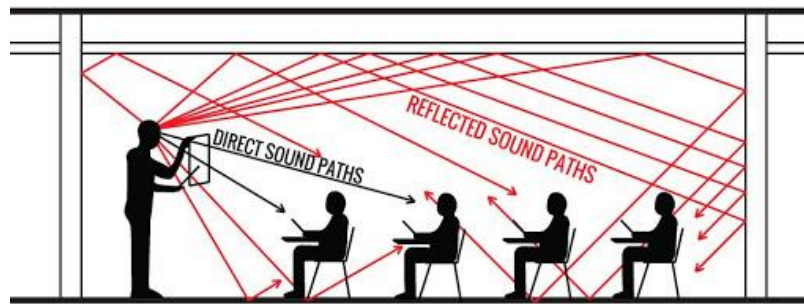


Figura 2.8 – Ondas diretas e refletidas. [23]

Chama-se Tempo de Reverberação ( $T$ ), ao intervalo de tempo, que um som demora a extinguir-se por completo após múltiplas reflexões e após a fonte sonora parar de emitir. Por definição é o tempo necessário que o nível de pressão sonora demora a decair 60 dB. [24] “Ou de outra forma, o tempo que a intensidade sonora demora a diminuir para 1 milionésimo ( $10 \log 1000000 = 60 \text{ dB}$ )”. No entanto esta definição, na prática, é muito difícil de obter. Isto porque o ruído de fundo irá sobrepor-se antes da extinção do som emitido. Assim sendo, é habitual obter um decaimento de 30 dB e extrapolar o decaimento daí, como pode ser verificado na Figura 2.9.[4,5]

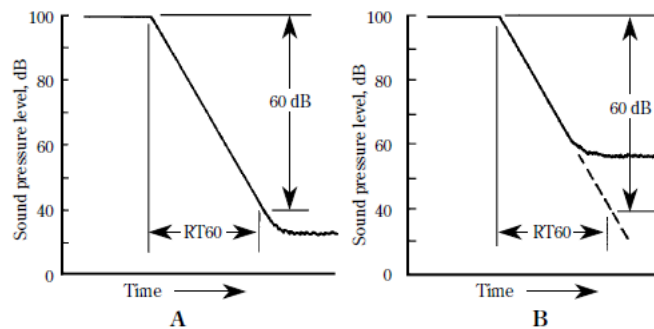


Figura 2.9 – Curvas de decaimento para medição do tempo de reverberação. No caso A, o ruído de fundo não interfere, sendo possível detetar o decaimento de 60 dB. No caso B, já não é possível devido ao ruído de fundo, sendo que se faz uma extrapolação. [4]

O tempo de reverberação pode ser obtido por medições, como se mencionou atrás, ou por aproximações, com expressões analíticas. Diversas fórmulas matemáticas foram desenvolvidas para prever o tempo de reverberação de um espaço, adaptando-se cada uma de forma mais apropriada a diferentes ocasiões.

### 2.3.2. FÓRMULA DE SABINE

Foi Wallace Clement Sabine, que em 1898, após muitas experiências na Universidade de Harvard, conseguiu relacionar o volume de um espaço e absorção sonora do mesmo, com o tempo de reverberação, obtendo a expressão a seguir apresentada. (expressão 2.16.) A expressão de Sabine para estimar o tempo de reverberação é adequada para ambientes sonoros difusos e com absorção sonora média inferior a 0,20. [4,5]

$$T = \frac{0.16V}{A} \quad (2.16.)$$

Onde:

T – tempo de reverberação (s);

V – volume do espaço (m<sup>3</sup>);

A – absorção sonora (m<sup>2</sup>).

$$A = \sum_{i=1}^n a_i \times S_i \quad (2.17.)$$

Onde:

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

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

A constante de valor 0.16, pode ser calculada com maior precisão e adaptada para todas as situações em particular, visto que está relacionada com a temperatura do ar, através da seguinte expressão.

$$K = \frac{24 \times \ln(10)}{c} \quad (2.18.)$$

Onde:

K – coeficiente da formula de Sabine (normalmente usado o valor 0,16);

c – celeridade do ar (m/s)

### 2.3.3. FÓRMULA DE EYRING

Em 1930 apareceu a também conhecida como fórmula de Norris-Eyring. Normalmente usada em espaços onde todas as superfícies têm  $\alpha_i$  semelhantes

$$T = \frac{0,16V}{-S \times \ln(1-\bar{\alpha})} \quad (2.19.)$$

Sendo  $\bar{\alpha}$  a media pesada dada por:

$$\bar{\alpha} = \frac{\sum a_i S_i}{\sum S_i} \quad (2.20.)$$

### 2.3.4. FÓRMULA DE MILLINGTON-SETTE

Poucos anos após a fórmula de Eyring, aparece esta fórmula, sendo mais adequada para situações em que existem diferenças significativas entre coeficientes de absorção das diversas superfícies da envolvente.

$$T = \frac{0,16V}{-\sum_{i=1}^N S_i \times \ln(1-a_i)} \quad (2.21.)$$

## 2.3.5. FORMULAÇÃO GENÉRICA

Existem mais formulações, como a de Kuttruff (1970). Mas em termos genéricos pode-se sistematizar a fórmula de Sabine da seguinte fórmula:

$$T = \frac{0,16V}{\sum_{i=1}^N a_i S_i + \sum_{j=1}^M A_j + mV} \quad (2.22.)$$

Onde:

$A_j$  – absorções sonoras localizadas ( $m^2$ );

$m$  – absorção sonora do ar ( $m^{-1}$ ) em função da humidade relativa e volume.

Quadro 2.4 – Absorção sonora do ar ( $m^{-1}$ ) em função da humidade relativa (valor por defeito deverá ser de 60%).

[4]

HR (%)	< 1k Hz	1k Hz	2k Hz	4k Hz	8k Hz	16k Hz
0	0	0	0	0	0	0
20	0	0,008	0,016	0,056	0,188	0,340
40	0	0,004	0,008	0,044	0,096	0,210
60	0	0,003	0,004	0,028	0,064	0,140
80	0	0,002	0,004	0,008	0,052	0,110

Quadro 2.5 – Exemplo de absorções sonoras localizadas,  $A_j$  [4]

$A_j$ ( $m^2$ )	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1k Hz	2k Hz	4k Hz
Pessoa de pé	0,19	0,33	0,44	0,42	0,46	0,37
Cadeira ou mesa de madeira/metal	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,04
Cadeira de madeira ocupada	0,17	0,36	0,47	0,52	0,50	0,46
Cadeira estofada ocupada	0,35	0,38	0,38	0,39	0,41	0,42

Em conclusão, o tempo de reverberação deve ser adequado à situação e utilização dos espaços, para que se crie um ambiente sonoro agradável para a sua finalidade. Tempos de reverberação baixos podem dar a sensação de falta de privacidade, na palavra, ou demasiada claridade das notas na música. Com tempos muito longos, e a palavra começa a ficar ininteligível, e na música dá-se a sobreposição de notas. Com isto é preciso que cada espaço tenha um tempo de reverberação adequado ao uso. O Quadro 2.6. apresenta alguns valores ideias de tempos de reverberação para diferentes utilizações.

Quadro 2.6 – Valores de tempos de reverberação médios (500-1k Hz) ideais para espaços em função do uso. [4]

Utilização	T mínimo (s)	T máximo (s)
Conferências	0,7	0,8
Teatro	0,7	0,9
Auditórios polivalentes	1,4	1,9
Ópera	1,3	4,0
Música sinfónica	1,4	2,2
Escolas primárias	0,4	0,9
Estúdios de gravação	0,4	0,6

## 2.4. ISOLAMENTO SONORO

### 2.4.1. INTRODUÇÃO

O isolamento sonoro em edifícios é fundamental para que ruídos provenientes do exterior e de outros locais do próprio edifício, não causem incómodo. [25] Vários estudos indicam que o ruído é causador de *stress*, distração e até insucesso académico. [26,27] Portanto, é da máxima importância, que os espaços letivos se encontrem corretamente isolados na envolvente para evitar que tal aconteça.

Este conceito é por diversas vezes aplicado de forma errada, uma vez que é normalmente tido em conta apenas o ruído exterior, que é por norma o mais incomodativo, especialmente perto de zonas de tráfego rodoviário, zonas industriais ou aeroportos. No entanto, falar em isolamento sonoro, é também referir os ruídos produzidos em espaços contíguos, que se podem propagar através de qualquer elemento da envolvente, sejam as paredes divisórias, ou até portas e janelas.

Existem dois casos de isolamento sonoro: a ruídos de condução aérea e a ruídos de percussão. Pode-se ainda contabilizar um terceiro caso, em que se separa o ruído de instalações e equipamentos para um grupo de diferente análise. Todos estes tipos de ruído podem ser transmitidos por via direta e por via marginal (Figura 2.10). De salientar que qualquer singularidade (como frinchas de janelas/portas, caixas de tomada, etc.) na envolvente, que não seja especialmente concebida, ou tratada, é um fator prejudicial, e diminui o isolamento sonoro do elemento de partição.

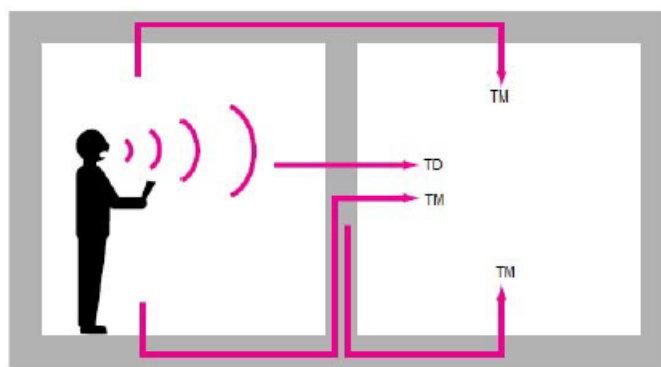


Figura 2.10 - Propagação do ruído entre espaços contíguos por via direta (TD) e marginal (TM). [28]

#### 2.4.2. RUÍDOS DE CONDUÇÃO AÉREA

Os ruídos de condução aérea são todos aqueles em que a sua transmissão se dá apenas devido a vibrações do ar (Figura 2.11). Isto significa que não existe qualquer solicitação mecânica sobre a estrutura envolvente para a propagação do som.

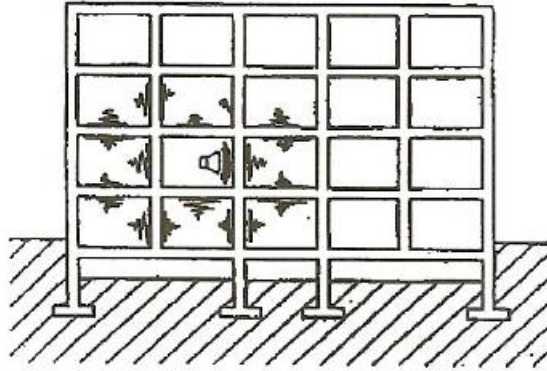


Figura 2.11 – Transmissão de ruídos de condução aérea [4]

O isolamento sonoro a ruídos de condução aérea pode ser quantificado com uma diferença entre os níveis de pressão sonora do emissor e o nível de pressão sonora no recetor, e chama-se de isolamento sonoro bruto ( $D$ ). Atualmente calcula-se o isolamento sonoro a ruídos condução aérea padronizado ( $D_{nT}$ ) que se obtém após a devida correção tendo em atenção o tempo de reverberação do compartimento recetor e um TR de referência ( $T_0$ ), como demonstrado na expressão 2.23. [4,29]

$$D_{nT} = L_1 - L_2 + 10 \log \left( \frac{T}{T_0} \right) \quad (2.23.)$$

Onde:

$D_{nT}$  – 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 recetor (dB);

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

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

No caso de fachadas, a expressão sofre algumas alterações e calcula-se de acordo com a expressão 2.24.

$$D_{2m,nT} = L_{1,2m} - L_2 + 10 \log \left( \frac{T}{T_0} \right) \quad (2.24.)$$

Onde:

$D_{2m,nT}$  – 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 recetor (dB);

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

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

Como refere a norma, estes valores ( $D_{nT}$  e  $D_{2m,nt}$ ) por banda de frequência e por ajustes através da curva de referência (CR), obtém-se o índice de isolamento sonoro a ruídos de condução aérea ( $D_{nT,w}$ ) e o índice de isolamento a ruídos de condução aérea da fachada ( $D_{2m,nT,w}$ ). [4,29]

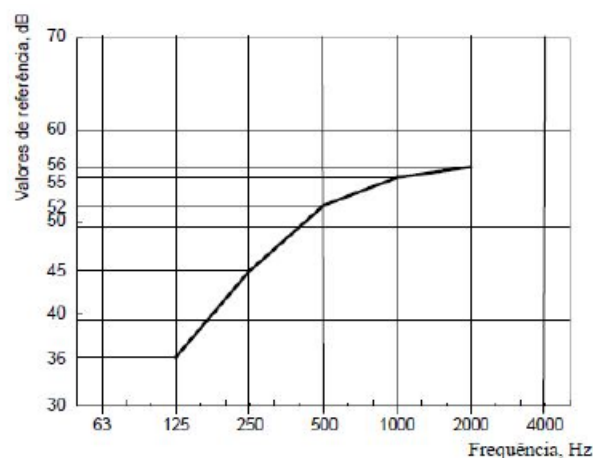


Figura 2.12 – Curva de Referência normativa (CR) para ruídos de condução aérea. [29]

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

Se todas estas medições forem executadas em laboratório, sem contabilização das transmissões marginais, calcula-se o valor de redução sonora ( $R$ ) do elemento que separa os espaços entre emissor e receptor. Com os valores de  $R$  para bandas de frequência obtém-se o ( $R_w$ ), que é o índice de redução sonora, também com ajuda da curva de referência

$$R = L_1 - L_2 - 10 \log\left(\frac{A}{S}\right) \quad (2.25.)$$

Onde:

- $R$  – redução sonora (dB);
- $L_1$  – nível médio de pressão sonora no local emissor (dB);
- $L_2$  – nível médio de pressão sonora no local recetor (dB);
- $A$  – absorção sonora do compartimento recetor ( $m^2$ );
- $S$  – superfície real do elemento separador ( $m^2$ ).

A melhor forma para melhorar o isolamento sonoro a este tipo de ruído, passa por aumentar a massa entre os elementos que separam os espaços (que pode ficar muito mais caro) ou, de forma mais económica, à sua duplicação física do material separador.

#### 2.4.3. RUÍDOS DE PERCUSSÃO

Ao contrário dos ruídos de condução aérea, os ruídos de percussão têm origem em solicitações mecânicas diretas da fonte sobre os elementos construtivos/de separação. Isto faz com a sua propagação espacial seja maior que os de condução aérea, devido ao facto de os elementos construtivos estarem rigidamente ligados. A origem dos ruídos de percussão pode provir de fontes estáticas (ventoinhas,

máquinas de lavar, etc.) ou em fontes de impacto (pessoas a caminhar, queda de objetos, portas a fechar, etc.) (Figura 2.13) [4]

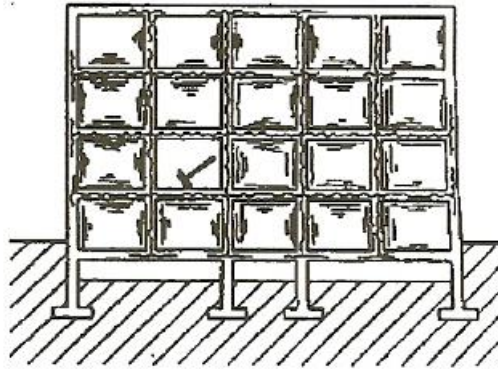


Figura 2.13 – Transmissão de ruídos de percussão. [4]

O cálculo do isolamento sonoro a ruídos de percussão é feito através de um dispositivo, denominado máquina de impactos normalizado. Ao contrário dos ruídos de condução aérea, não é possível medir o isolamento através da diferença dos níveis de pressão entre os espaços emissor e recetor, isto porque o ruído produzido no espaço emissor só tem uma pequena relação com o percebido no espaço recetor.

Recorre-se então à máquina de impactos para efetuar uma simulação normalizada de impacto no pavimento através do método descrito na EN ISO 10140-3 e NP ISO 140-7 modificadas pela ISO 16283. Como nos ruídos de condução aérea, os resultados do isolamento sonoro a ruídos de percussão padronizado ( $L'_{nT}$ ) são ajustados numa curva de referência, para ruídos de percussão obtendo assim o índice de isolamento sonoro a ruídos de percussão padronizado ( $L'_{nT,w}$ ). [4,30]

$$L'_{nT} = L_i - 10 \log\left(\frac{T}{T_0}\right) \quad (2.26.)$$

Onde:

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

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

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

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

O ajuste fica completo quando a soma dos afastamentos de  $L'_{nT-CR}$  a dividir pelo número de bandas de frequência for o maior possível sem ultrapassar dois. Novamente o valor de  $L'_{nT,w}$  é o valor da curva de referência ajustado nos 500 Hz.

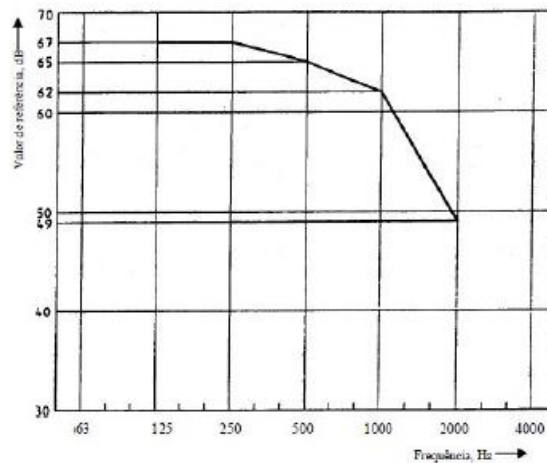


Figura 2.14 – Curva de Referência normativa (CR) para ruídos de percussão. [4,30]

A melhor e mais eficaz forma para minimizar as perturbações por este tipo de ruído, é atuar sobre as superfícies, tornando-as resilientes, ou sobre a continuidade dos elementos, quebrando essa continuidade, reduzindo assim a sua capacidade de propagação. Também é possível atuar na fonte do ruído, passando por afastar as fontes (quando possível) dos espaços onde se desejam baixos níveis sonoros.

Na Figura 2.15. apresenta-se um exemplo de como se pode atuar num pavimento/cobertura para a redução dos níveis sonoros.

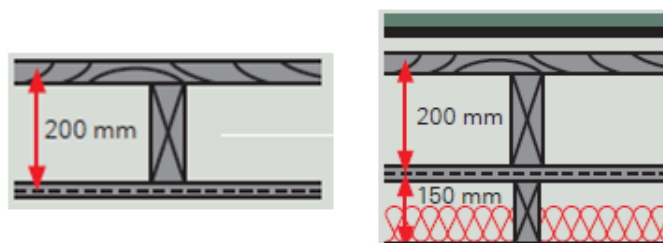


Figura 2.15 – Exemplo de intervenção de pavimentos para melhoria a isolamento a ruídos de percussão. À esquerda, pavimento existente, à direita solução melhorada. (adaptado [31])

Do lado esquerdo um exemplo de um pavimento simples existente e do lado direito, uma solução de melhoria com aplicação de um teto falso em gesso cartonado, com isolamento de lã mineral. Foi também aplicada uma camada flutuante (a verde) na zona do emissor.

## 2.5. INTELIGIBILIDADE DA PALAVRA

### 2.5.1. INTRODUÇÃO

O Homem vive em sociedade e, por isso, tem a necessidade de se relacionar e comunicar com outros seres humanos. Existem muitas formas de comunicação, como sinais ou escrita, mas a mais importante e regular no dia-a-dia é a palavra. No entanto, a transmissão da mensagem ou palavra entre um emissor e um recetor, é por diversas vezes comprometida. Seja por más condições acústicas do espaço, seja pelo ruído de fundo, ou por qualquer outro motivo, o que faz com que tenha de haver um maior esforço de ambas as partes para que a comunicação seja possível e adequada.

A inteligibilidade da palavra, é, portanto, uma característica acústica de um espaço e traduz a facilidade de compreensão da palavra. [32] No âmbito desta Dissertação, este conceito é da demais importância, porque nas escolas a maior fonte de transmissão de conhecimento continua a ser pela palavra entre alunos e docentes, sendo, portanto, necessário que os espaços letivos tenham condições adequadas.

Para garantir que a inteligibilidade seja boa é preciso atender às variáveis da emissão da voz, que são as seguintes:

- Frequência;
- Intensidade;
- Duração;
- Direccionalidade.

No que diz respeito à frequência de emissão, esta varia numa vasta escala, delimitada entre os 150/300 Hz e os 3500/7000 Hz, para a língua portuguesa. Em relação ao nível de pressão sonora de emissão, a diferença entre os sons menos intensos (consoantes) para os mais intensos (vogais) é de aproximadamente 28 dB. A duração média das vogais é de cerca de 90 ms enquanto que as consoantes têm uma duração de 20 ms. (ver o Quadro 2.7.) Esta diferença de duração das letras, é o que faz com que o tempo de reverberação (TR) das salas seja importante. Uma sala com um elevado TR faz com que haja sobreposição e como as vogais têm maior durabilidade no ar, sobrepõem-se às consoantes, causando uma má inteligibilidade. Em termos de direccionalidade, o ser humano emite para a frente do orador, mas com variabilidade direccional em função da frequência, como demonstrado na figura 2.16 para diversas frequências. [4,33]

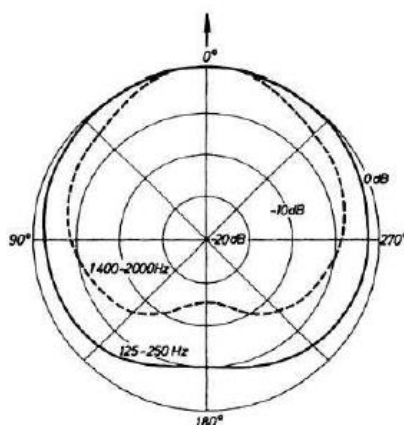


Figura 2.16 – Contornos da emissão da palavra no plano horizontal. [33]

Quadro 2.7 – Quadro resumo da variabilidade da emissão da voz entre vogais e consoantes. [4,33]

TIPO	Frequência	Intensidade	Duração	Direccionalidade
Vogais	Baixas	Elevado	90 ms	-5 dB p/-180°
Consoantes	Altas	Baixo	20ms	-20 dB p/-180°

### 2.5.2. PARÂMETROS DE MEDIDA

Existem diversos testes para avaliar a inteligibilidade da palavra, podendo estes dividir-se em dois grupos distintos: os testes objetivos e os subjetivos. Os primeiros são realizados por métodos mais analíticos, não recorrendo a resposta humana, apresentando menor subjetividade, enquanto que os segundos, baseiam-se em leitura de frases e/ou palavras para um grupo, que as redige. A inteligibilidade do espaço será dada pela percentagem de acerto. [4]

Entre os testes subjetivos existem, por exemplo, os seguintes:

- PBw (Phonetically Balanced words);
- MRT (Modified Rhyming Tests).

Entre os testes objetivos podem-se numerar, entre outros, os seguintes:

- AI (*Articulation Index*);
- SIL (*Speech Interference Levels*);
- AC (*Articulation Class*);
- RASTI (*Rapid Speech Transmission Index*).

- O índice de articulação (AI) é proporcional ao grau de inteligibilidade. É obtido através da diferença entre o nível de conversão (nc) de referência e o ruído de fundo (rf) no local. Esta diferença multiplicada pelo peso (p) de cada uma das bandas de frequência. Todos estes valores são somados no final, sendo que o somatório será dividido por 10000 para obter o valor de AI. O valor obtido é confrontado com o Quadro 2.8. dando por fim o grau de inteligibilidade em função do AI.

Quadro 2.8 – Quadro auxiliar do método de cálculo de AI. [4]

Frequência (Hz)	Nível de conversão (nc)	Peso (p)	Ruído de fundo (rf)	nc-rf	(nc-rf) x p
250	72	18			
500	73	50			
1000	78	75			
2000	63	107			
4000	58	83			
				$\Sigma =$	
					$AI = \Sigma / 10000 =$

Quadro 2.9 – Grau de inteligibilidade em função do AI. [4]

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 conversão (SIL) é calculado através da média aritmética dos níveis de pressão sonora dos ruídos de fundo (rf), em cada banda de oitava dos 500 aos 2000 Hz.

$$SIL = (RF_{500Hz} + RF_{1000Hz} + RF_{2000Hz}) / 3 \quad (2.27.)$$

O Quadro 2.10. apresenta os valores de SIL (em dB) para o qual a comunicação da palavra é, no mínimo, possível.

Quadro 2.10 – Valores de SIL para o qual a comunicação da palavra é perceptível, de acordo com a distância. (M: Masculino; F: Feminino). [4]

Distância (m)	SIL (dB)							
	Esforço de Voz							
	Normal		Elevado		Muito Alto		Gritar	
	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	59	60	55	66	61
4,0	46	41	52	47	58	53	64	59

- O *Articulation Class* (AC), pertencente também aos métodos objetivos de avaliação, é obtido através da diferença entre o nível de conversão de referência (nc) e o nível de ruído de fundo (rf) no local, multiplicada por um peso (p) atribuído a cada uma das bandas de frequência de 1/3 de oitava. Esta análise é feita na gama dos 200 aos 5000 Hz. É um método de cálculo semelhante ao AI, mas com mais bandas de frequência. [4,34,35]

$$AC = \sum_{i=1}^{15} \Delta L_i \cdot peso_i \quad (2.28.)$$

Quadro 2.11 – Valores para método de obtenção do AC. [4]

Frequência (Hz)	Nível de conversão ( <i>nc</i> )	Peso ( <i>p</i> )	Frequência (Hz)	Nível de conversão ( <i>nc</i> )	Peso ( <i>p</i> )
200	67	4	1250	62	30
250	68	10	1600	60	37
315	69	10	200	59	37
400	70	14	2500	57	34
500	68	14	3150	55	34
630	66	20	4000	53	24
800	65	20	5000	51	20
1000	64	24	-	-	-

- O *Speech Transmission Index* (STI) ou o *Rapid Speech Transmission Index* (RASTI) são os métodos mais utilizados para avaliar o parâmetro da inteligibilidade. Este último método foi elaborado por Houtgast e Steenekene e é uma versão mais curta do STI. [36] Este índice é obtido com recurso a um equipamento com emissor e recetor. O emissor emite o sinal sonoro e o recetor analisa a distorção desse som. Os valores podem variar entre 0 (má inteligibilidade) e 1 (boa inteligibilidade). [37]

Quadro 2.12 – Tabela de conversão RASTI da Norma IEC 268-16. [18]

RASTI	Grau de Inteligibilidade
[0,00 – 0,30[	Má
[0,30 – 0,45[	Mediocre
[0,45 – 0,60[	Suficiente
[0,60 – 0,75[	Boa
[0,75 – 1,00]	Excelente

# 3

## ESTADO DA ARTE

### 3.1. GENERALIDADES

Não é recente a constatação da necessidade de espaços acusticamente sãos onde a transmissão da mensagem é importante. Na era romana, Vitruvius, arquiteto romano do século I a.C., que tal como outros pensadores da altura, sabia que o som era um conjunto de ondas e tinha, ainda, noções acústicas, como reflexões e reverberação. Foram esses conhecimentos que, na altura, o levaram a implementar, em zonas específicas dos teatros, vasos acústicos, para quando “a voz, pronunciada do palco, batendo e refletindo contra as cavidades dos diferentes vasos, conforme entra em contacto com estes, será aumentada a clareza do som, e despertará uma nota harmoniosa em unísono”. Mais tarde, já a meados do séc. XVII, após a Reforma Católica, Sir Christopher Wren, no seu projeto para igrejas, estabelecia dimensões máximas para a nave e localizava os púlpitos para que os fiéis conseguissem ouvir claramente o sermão. [38]

Foi então, que no final do séc. XIX, surge Wallace Sabine a abordar problemas acústicos numa sala de aula, a “Fogg Lecture Hall“, localizada no então construído Museu de Arte Fogg (1885). A sala em questão apresentava sérios problemas acústicos, causados essencialmente pelo excesso de reverberação e tinha sido abandonada. [39] Foi atribuída a missão de averiguar o problema da sala, a Wallace Clement Sabine, na altura jovem professor de física sem conhecimento específico sobre som. Durante um período de três anos Sabine e os seus assistentes passariam as noites a mover materiais entre o Teatro Sanders e a “Fogg Lecture Hall”. Usando diferentes tipos de materiais, um cronómetro e um tubo de órgão num processo de tentativa erro, Sabine foi percebendo que o tempo de reverberação decaía de forma diferente na presença dos diferentes tipos de materiais. Foi testando então uma variedade de tipos de tapetes, diversos números de almofadas e pessoas. [40] Foi então que Sabine estabeleceu a relação entre a qualidade acústica, dimensão do espaço e quantidade de superfície absorvente e definiu o tempo de reverberação como o número de segundos necessários para esse som se extinguir, como já abordado no subcapítulo 2.3. Isto tornou-se a Fórmula de Sabine e ainda é usada nos dias de hoje. [41]

### 3.2. RUÍDO E APRENDIZAGEM

A qualidade acústica em escolas, tanto em Portugal como na Europa, é uma problemática pouco valorizada. De acordo com Knut Marczinske, “se olharmos para as salas de aula ao longo da Europa, as propriedades acústicas destas salas são tão más, que devemos ter a ideia de que não deverá haver conhecimento de acústica para salas disponível”, mas a realidade é que a maior parte dos espaços escolares não têm qualquer tipo de tratamento acústico. Facilmente se pensa que os estabelecimentos de ensino são, por diversas vezes, edifícios antigos, e, portanto, não haveria conhecimento sobre esta

problemática. No entanto, é possível encontrar documentos e estudos que reconhecem a importância de boa qualidade acústica e inteligibilidade da palavra em salas de aulas que datam do final da década de 1930 e início da década de 1940. [42] Apesar disso, nessa época todos os edifícios escolares eram construídos sem o parecer de um especialista acústico, mas, dos últimos anos para cá, esta tendência tem vindo a mudar, graças à sensibilização para a importância da inteligibilidade da palavra para o sucesso académico e do ruído que causa o insucesso da aprendizagem com estudos que apoiam essa premissa.

Em 1980, testaram-se alunos de quatro escolas primárias de Los Angeles sujeitas a elevado ruído exterior (devido a presença de aeroportos na proximidade) com níveis de ruído a chegar aos 95 dB, e alunos de outras escolas, onde o ruído exterior não seria incomodativo. Cohen *et al.* pediram aos alunos para realizar três tarefas cognitivas (execução de puzzles, por exemplo) e mediram a pressão arterial dos mesmos alunos. No final do estudo, chegaram à conclusão, que os alunos das escolas mais ruidosas apresentavam, por norma, pressão arterial mais elevada, o que provou que o ruído, além de não permitir uma boa inteligibilidade da palavra, tem um impacto físico nos seres humanos, e esses alunos sujeitos a maior ruído eram mais propensos a desistir das tarefas. [3,43]

Bronzaft *et al.* num estudo de 1975, numa escola a 67 metros de uma linha ferroviária de cota elevada, testou o impacto do ruído exterior no desempenho académico dos alunos. Nesse estudo, onde foram analisados alunos do 2º e 6º ano de escolaridade, compararam os resultados de leitura dos alunos dos dois anos em salas com níveis de ruído exterior diferentes. Concluíram nesse estudo, que os alunos da sala que confrontava a linha de ferro, encontravam-se 3 a 4 meses atrás, em nível de aprendizagem, em comparação com alunos que tinham as suas aulas em pontas opostas da escola, mais silenciosas (Figura 3.1). [44]

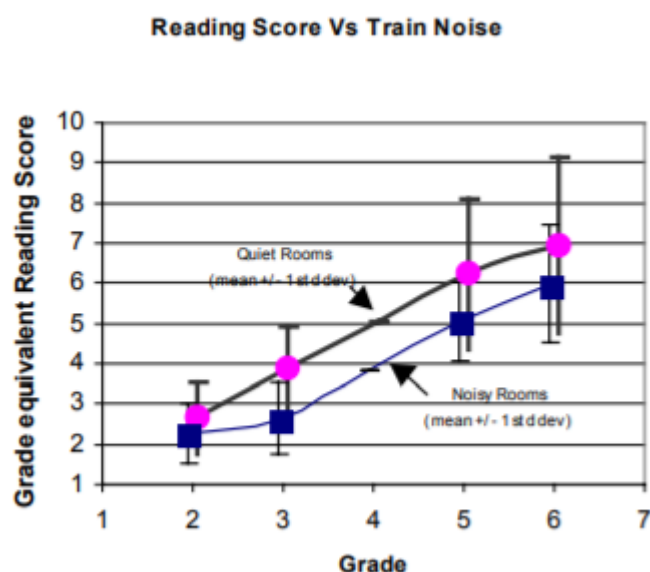


Figura 3.1 – Classificação de leitura entre alunos em salas que confrontam uma linha ferroviária de cota elevada, e alunos de salas com menor ruído exterior. (adaptado de [44])

Anos mais tarde, em 1981, e após um esforço bem-sucedido de reduzir o ruído propagado pela linha ferroviária, em 3 dB (praticamente metade do ruído anteriormente experienciado) em ambas as extremidades da escola, voltaram a realizar os mesmos testes que foram efetuados em 1975. Concluíram que continuava a haver uma discrepância entre as salas mais ruidosas e as mais silenciosas no que toca

a aproveitamento académico. No entanto, agora os alunos se encontravam 11 meses atrás em nível de leitura, o que pode sugerir que, o efeito acumulativo do ruído ao longo dos anos tem efeitos graves no sucesso escolar. [45,1]

No ano de 1997, Maxwell *et al.*, com a já bem estabelecida documentação de Cohen *et al.* nos efeitos do ruído em jovens alunos e na sua dificuldade de aprendizagem, abordou o assunto que a possibilidade de tal dificuldade se deveria a um “mecanismo de ruído-aprendizagem de leitura”. Crianças aprendem a falar antes de começar a ler e, por isso, no seu trabalho, Maxwell *et al.*, testaram 90 crianças dos dois primeiros anos de ensino, no primeiro ano em condições ruidosas e no segundo ano após a aplicação de material absorvente sonoro nas salas e testaram os alunos em três parâmetros de leitura, como por exemplo rima de palavras, onde era pedido aos alunos para escolher de três palavras, aquela que rimava com a palavra-alvo. Os parâmetros foram avaliados usando dois testes padronizados: O TERA-2 (*Test of Early Reading Ability*) e o MRT6 (*Metropolitan Readiness Tests*). No final concluíram, tal como vários estudiosos antes de si, que as crianças em condições mais silenciosas, tinham melhor desempenho, indicando que a exposição crónica a elevados níveis de ruído afeta negativamente os alunos nos primeiros anos de escolaridade. [46]

Outro estudo sobre os efeitos do ruído no sucesso escolar, foi conduzido por Lukas *et al.*, em 2001. Estes testaram 14 escolas em Los Angeles, Califórnia, a diversas distâncias de autoestradas. Essas diferentes distâncias faziam com nas salas de aula variassem em 19 dB(A) entre as várias escolas. Os alunos foram testados a nível de leitura e matemática. Os resultados obtidos neste estudo para as pontuações de leitura equivalente em função do nível de ruído ponderado em C (ruídos de baixa frequência, visto que os de elevada frequência eram idênticos nas salas sejam as mais próximas ou distantes) nas salas de aula são apresentados na Figura 3.2. [1,47]

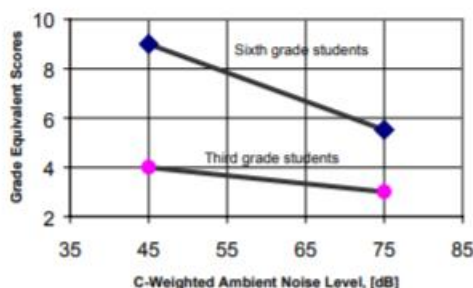


Figura 3.2 – Desempenho dos alunos sujeitos a diferentes níveis de ruído. Alunos expostos a níveis inferiores, obtém melhores resultados. (adaptado de [1])

Muitos outros estudos e comunicações têm sido publicados sobre os efeitos de ruído exterior no progresso da aprendizagem em alunos, especialmente em mais novos, mas todos revolvem na premissa de que as salas de aulas devem ser ambientes silenciosos para a concentração e captação da mensagem dos docentes. Foi então que Bradley, em 2007, recomendou que o ruído de fundo não ultrapasse os 35 dB(A), para atingir uma boa inteligibilidade da palavra, se bem que, para alunos ligeiramente mais velhos, valores na ordem dos 40 dB(A) sejam igualmente aceitáveis.

### 3.3. TEMPO DE REVERBERAÇÃO E APRENDIZAGEM

Tal como o ruído exterior, o tempo de reverberação de uma sala, tem um papel igualmente importante para o sucesso académico dos pupilos. Uma sala com um elevado tempo de reverberação, irá fazer com que as ondas diretas e refletidas se sobreponham, causando dificuldade na perceção da palavra.

Em 1999, Bistafa *et al.* apresentaram num estudo, os valores de tempo de reverberação para atingir uma boa inteligibilidade da palavra para diversos métodos de análise (Quadro 3.1). Facilmente se repara, que para a banda de frequência de 1000 Hz, os tempos de reverberação ideais se encontram entre os 0,1 segundos e os 0,8 segundos. [48]

Quadro 3.1. – Tempos de Reverberação  $T^*$  que maximizam a inteligibilidade da palavra para vários volumes de sala de aula e para cinco  $L_n-L_{sp1m}$  ( $L_n$ - nível sonoro do ruído de fundo;  $L_{sp1m}$  – nível sonoro a um metro à frente do orador). Todos os valores do tempo de reverberação são para a banda de frequência de 1000 Hz. (adaptado de [48])

$L_n-L_{sp1m}$ (dB)	Parâmetro	$T^*$ (s)		
		Volume da sala de aula ( $m^3$ )		
		100	300	500
-10	Q	0,4	0,6	0,6
	$R_{sn}$	0,5	0,6	0,7
	$U_{50}$	0,4	0,5	0,6
	STI	0,5	0,7	0,8
	$Al_{cons}$	0,5	0,7	0,8
-15	Q	0,3	0,4	0,5
	$R_{sn}$	0,4	0,5	0,5
	$U_{50}$	0,3	0,4	0,5
	STI	0,3	0,4	0,5
	$Al_{cons}$	0,4	0,5	0,6
-20	Q	0,2	0,3	0,3
	$R_{sn}$	0,3	0,4	0,4
	$U_{50}$	0,2	0,3	0,3
	STI	0,2	0,3	0,4
	$Al_{cons}$	0,3	0,4	0,4
-25	Q	0,2	0,2	0,3
	$R_{sn}$	0,2	0,3	0,3
	$U_{50}$	0,2	0,2	0,2
	STI	0,2	0,2	0,3
	$Al_{cons}$	0,2	0,3	0,3
-30	Q	0,2	0,2	0,2
	$R_{sn}$	0,2	0,2	0,3
	$U_{50}$	0,1	0,2	0,2
	STI	0,1	0,2	0,2
	$Al_{cons}$	0,2	0,2	0,3

Hagen *et al.*, em 2002, afirmaram que uma sala com tempos de reverberação elevados, além de exigirem maior esforço por parte dos alunos, o processo de captar e assimilar a mensagem é feito com maior dificuldade. [49]

Em 2006, um estudo conduzido por Klatte *et al.* analisou o efeito do tempo de reverberação na percepção de palavras numa frase complexa em alunos do 2º ano de escolaridade. Conduziram o teste na sala de aula dos alunos e depois numa outra sala extra (sala de controlo) com tempos de reverberação na ordem dos 0,5 segundos, que de acordo com o DIN 18041[50] Alemão é um valor favorável para salas de aula. Os resultados foram depois confrontados com os de outra escola. Os alunos da escola, onde o tempo de reverberação da sua sala era mais elevado que o tempo de reverberação da sala de controlo, foram, sem surpresa, mais mal sucedidos. [51]

### 3.4. IMPACTO NOS PROFESSORES

Além dos efeitos negativos na aprendizagem dos alunos devido a possíveis más condições acústicas nas salas de aula, como excesso de ruído ou tempos de reverberação elevados, como já mencionado, estas más condições também podem levar a stress adicional e problemas de saúde física aos professores. Numa sala, devido ao excesso de ruído e/ou reverberação, os professores podem involuntariamente aumentar o tom de voz. Este reflexo involuntário é denominado de efeito de Lombard, e, quando prolongado durante longos períodos, como aulas mais extensas, ou dias de trabalho mais prolongados em más condições, podem, a longo prazo, causar sintomas como: rouquidão, desconforto, maior cansaço, maior esforço a usar a voz, e até perda de alcance vocal. Todos estes problemas poderão ser uma das causas responsáveis por uma elevada desmotivação dos professores a lecionar. [52]

Silva *et al.*, num estudo de 2008 em que analisaram o nível de sonoro dos professores de duas escolas, uma mais ruidosa que outra e verificaram que os professores tendem a ajustar a voz de acordo com o ruído existente. No entanto na escola mais ruidosa (onde o nível sonoro contínuo equivalente do ruído de fundo é cerca de 9 dB superior ao da escola menos ruidosa), apesar do esforço dos professores, estes não sendo capazes de superar o ruído de fundo (como demonstrado na figura 3.4), mantêm as vozes ao nível do ruído de fundo, causando uma grande inteligibilidade da palavra. [53]

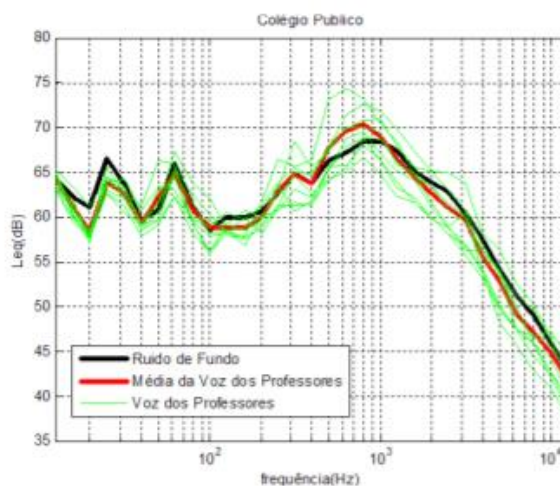


Figura 3.3 – Comportamento do  $L_{eq}$  (nível sonoro contínuo equivalente) da gama de frequência dos 12,5 aos 12500 Hz na escola ruidosa do estudo de Silva *et al.* Como se verifica pela linha a verde, a voz do professor é ajustada em função do ruído de fundo (preto). (adaptado de [53])

### 3.5. CANTINAS E GINÁSIOS ESCOLARES

#### 3.5.1. INTRODUÇÃO

Muito já se estudou sobre a interferência do ruído nas salas de aula na aprendizagem. No entanto, escolas têm outros espaços como cantinas, ginásios e bibliotecas onde os alunos também passam parte do seu dia, e daí ser necessário que também estes espaços apresentem boas condições acústicas. Apesar disso, estudos acústicos referentes a estes espaços são bastantes raros. No entanto, a preocupação com isto tipo de conforto acústico nestes espaços tem vindo a crescer. [54]

#### 3.5.2. CANTINAS ESCOLARES

Sabe-se que locais como as cantinas escolares e ginásios têm poucas condições acústicas e isso facilmente se sente quando alunos tentam manter um diálogo neste espaço a um tom aceitável sem a necessidade de gritar, e como Pinho *et al.* verificara num estudo em escolas de Viseu no ano 2017, em que mediram os níveis de pressão sonora das cantinas, chegaram a valores entre os 80 e os 88 dB(A), valores similares a encontrar-se no meio de uma autoestrada em hora de ponta, o que são valores pouco aceitáveis para qualquer espaço letivo. [55]

Mas um dos primeiro grandes trabalhos acústicos sobre este tipo de espaços, surge pela mão de Moulder em 1993 nos E.U.A.[56]. A premissa do seu trabalho passaria por avaliar diversos parâmetros acústicos em treze restaurantes do país, em especial o tempo de reverberação e o ruído de fundo. Moulder, após medições *in situ* com e sem ocupação nos restaurantes, chegou a valores de tempo de reverberação que variavam entre 0,36 e os 0,95 s para a banda de frequência entre os 500 e os 2k Hz, e valores de ruído de fundo entre os 55 e os 68 dB(A), que considerou inaceitáveis e sugeriu para estes espaços que o tempo de reverberação nunca ultrapassasse o 0,5 s. Com o trabalho de Moulder muitos outros autores começaram a estudar espaços de restauração, até que em 1997, Tang *et al.* estudaram o Efeito *Lombard* (que é o aumento da elevação da intensidade da palavra devido à elevação de ruído de fundo existente) numa cantina de um estabelecimento de ensino superior de Hong Kong, e notaram que era comum a intensidade da palavra dos utilizadores aumentar quando o ruído de fundo ultrapassava os 69 dB(A). [57]

Já em 2013, Hamayon [58] na sua publicação, analisou os diversos parâmetros acústicos regulamentares para edifícios escolares franceses e em diversos espaços. Os valores limites do tempo de reverberação teriam de ser inferiores a 1,2 s para espaços com menos de 250 m<sup>3</sup>, sendo que este tempo de reverberação seria a média das bandas de frequência de oitava de 500 a 2k Hz.

Em 2014, Battaglia [59], estudou o conforto acústico de diversos restaurantes através de inquéritos padrão para onze restaurantes distintos, obtendo 825 respostas ao inquérito no total. Os resultados indicavam que havia uma grande correlação entre o tempo de reverberação do espaço, com o conforto acústico, e que existe um intervalo de tempo de reverberação entre os 0,5 e os 0,7 s para haver conforto acústico dependendo da faixa etária.

#### 3.5.3. GINÁSIOS ESCOLARES

Em 2011, Zamarreño *et al* [60], menciona que nos espaços desportivos, sejam eles escolares ou não, todos os aspetos acústicos não são alvo de grande preocupação. Isto sem antes, Ryan S. em 2009 ter referido que os ginásios/pavilhões gimnodesportivos escolares são hostis para a audição e ainda podem prejudicar as crianças, não só a nível auditivo, mas também académico. [61]

Wroblewska em 2010 [62], referiu que valores altos, tanto para o tempo de reverberação como para o ruído de fundo, têm impactos negativos na inteligibilidade da palavra e a nível de concentração. Refere também que a regulamentação polaca estabelece um limite máximo de ruído de fundo em ginásios/pavilhões escolares de 55 dB(A). Sendo que estes valores legislativos são muito elevados, em comparação com os valores de ruído de fundo propostos por Isbert em 1998 [63] de 40 a 50 dB(A) ou até mesmo da ASHRAE que menciona valores no mesmo intervalo, para ginásios desportivos. No entanto a ASHA (American Speech, Language, Hearing Association) vai mais longe e recomenda valores ainda mais baixos, na ordem dos 30 dB(A).

Também na sequência dos seus trabalhos, Zamarreño *et al.* [60] em 2011 recomendaram valores de tempo de reverberação adequados para um pavilhão de 12900 m<sup>3</sup>. Wroblewska em 2010 [62] refere que espaços gimnodesportivos com volume igual a 5600 m<sup>3</sup> deveriam apresentar tempos de reverberação entre 1,5 s e 2,27 s, de acordo com a norma britânica BB93:2000 [64] e a SN 520181:2006 suíça [65]. O Quadro 3.2 é um quadro resumo dos tempos de reverberação sugeridos para ginásios por diversos autores.

Quadro 3.2 - Valores de tempo de reverberação sugerido por diversos autores, para ginásios escolares.

Autor	Ano	Volume (m <sup>3</sup> )	Tempo de reverberação (s)
Isbert [63]	1998	1000 – 100000	1,0- 3,0
Nijs and Schuur [66]	2003	5000	≤ 1,5
Hamayon [58]	2006	10000	2,0 – 2,2
Wroblewska [62]	2010	5600	1,5 – 2,27
Zamarreño <i>et al.</i> [60]	2011	12900	≤ 2,1

### 3.6. CUSTO DA MELHORIA DE SALAS DE AULA

De acordo com David Lubman, nos Estados Unidos da América são dispensados cerca de 300 milhões de dólares todos os anos para escolas K-12 (designação norte americana para estabelecimentos de ensino do infantário ao 12º ano de escolaridade). Desse valor apenas 10% são usados para os edifícios escolares. No entanto, para boas condições acústicas, só seria necessário despender cerca de 1% do custo gasto nos edifícios, que daria 0,1% dos 300 milhões de dólares, ou seja, valores na ordem dos 300 mil dólares seriam suficientes. [67]

Sutherland *et al.*, calcularam o custo benefício de uma sala de aula em 2001 se, esta fosse melhorada com um teto acústico (se a arquitetura da sala o permitir). Chegaram à conclusão de que o custo para melhorar uma sala com um teto acústico medíocre (NRC = 0,55) e um teto acústico de boa qualidade (NRC = 0,75) é de apenas menos de 1 dólar por estudante por ano, quando amortizado para uma vida útil de 20 anos (Quadro 3.3). Além disso, um teto acústico de melhor qualidade, por apenas essa diferença de 1 dólar por aluno por ano, permite um tempo de reverberação de quase 0,2 segundos menor, o que permite uma melhor inteligibilidade da palavra, especialmente nos estudantes mais novos. [68]

Quadro 3.3. – Custo e desempenho de dois tipos de tetos acústicos para uma sala de aula nos E.U.A. em 2001 (30 alunos, 100 m<sup>2</sup>). (adaptado de [68])

	Total de custo por sala (US \$)	Custo por ano [20 anos de vida útil] (US \$)	Custo por estudante por ano (US \$)	Tempo de Reverberação para uma sala de 283 m <sup>3</sup> vazia com um pé-direito de 2,75 metros (s)
NRC 0,55	1054-1221	53-61	2,64-3,05	0,75
NRC 0,75	1443-1610	72-80	3,60-4,03	0,56
Diferença de custos e TR entre NRC 0,75 e NRC 0,55	389	19	0,97	0,19

No mesmo estudo em 2001, Sutherland *et al.*, analisaram o custo/benefício de uma sala melhorada com um teto acústico. Sabendo que nos E.U.A. o custo de educação de uma criança por ano numa sala de aula convencional é de cerca de 7000 dólares e sabendo também que com o teto acústico, são percebidas 3% mais frases de forma correta, esta correção acustica, medida economicamente prevê uma melhoria de  $0.03 \times 7000$  ou seja 210 dólares. Concluindo que 1 dólar dispensado por aluno por ano num bom teto acústico, o valor económico do teto ultrapassa o seu investimento num factor de 200. [68]

Noutro estudo também em 2001, Karabiber *et al.*, estimaram o custo para melhorar acusticamente uma sala de aula existente. A sala de aula objeto de estudo por Karabiber (Figura 3.4), é o tipo de sala de aula de escolas primárias na Turquia, muito similar às escolas portuguesas, e a Figura 3.5 apresenta as características físicas da mesma sala assim como os tempos de reverberação da mesma sala, antes da melhoria. [69]

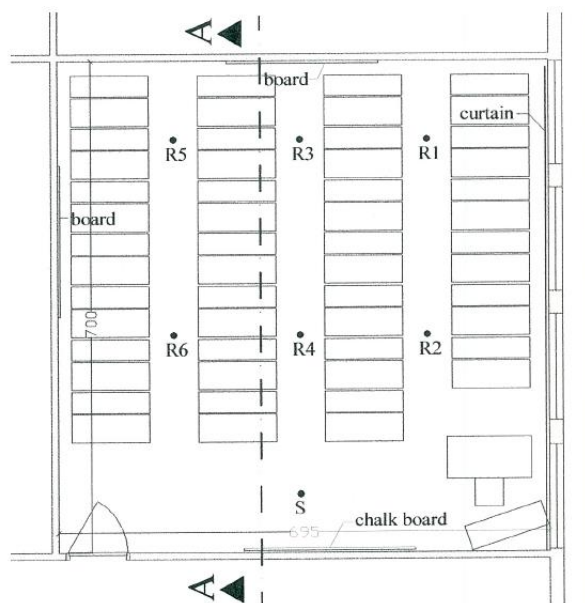


Figura 3.4 – Planta da sala de aula típica na Turquia. (adaptado de [70])

Quadro 3.4 – Propriedades físicas da sala de aula na Turquia em 2001. (adaptado de [69])

Dimensões da sala de aula: comprimento = 7,0 m; largura = 6,5 m; altura = 2,85 m S = 176 m <sup>2</sup> ; V = 138,6 m <sup>3</sup> ; N = 50 alunos e 1 professor			
Superfície	S (m <sup>2</sup> )	Material	
Teto	48,7	Betão	IIC 25
Piso	48,7	Ladrinhos de pedra	STC 52
Parede	60,9	Tijolo de gesso	STC 50
Janela	7,1	Vidro simples de 4mm	STC 26
Port	2,2	Madeira de núcleo sólido	STC 22
Arsódia	3,1	Painel de plástico duro	
Cortina	14,0	Duas camadas: tecido leve e tule	
Quadro	6,0	Painel de madeira	

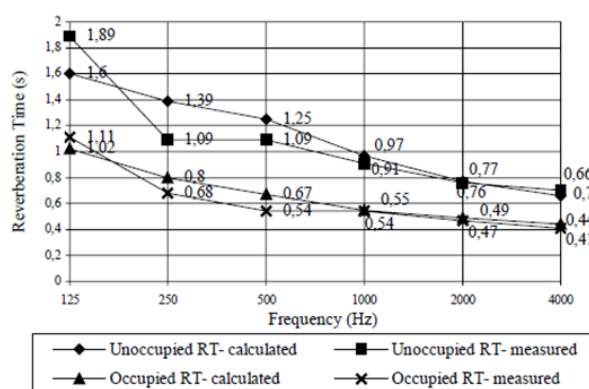


Figura 3.5 – Tempo de reverberação estimado e medido das salas de aula. [69]

Repararam então que o tempo de reverberação nas frequências dos 500-1000 (importante para a transmissão da palavra) encontrava-se na ordem de 1 segundo. Para baixar este valor, e dentro de diversas possibilidades, foram usados os materiais e a forma de aplicação mais baratas, porque o preço é o fator preponderante para persuadir os responsáveis. Então, as superfícies das paredes foram revestidas com material acústico e optaram por deixar o teto e o quadro inalterados de forma a permitir as primeiras reflexões. E dentro de outras pequenas alterações, conseguiram baixar o tempo de reverberação em quase 0,5 segundos na gama de frequência entre os 500 e os 1000 Hz, como está demonstrado no Quadro 3.4. Foram gastos na aplicação dos materiais absorventes nas paredes 220\$ e nas outras alterações cerca de 280\$ perfazendo um total de 500\$, o que é um valor bastante razoável, para uma melhoria significativa. [69]

Quadro 3.5 – Tempos de Reverberação após tratamento acústico da sala. (adaptado de [69])

TR (s) / f (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
Desocupado	0,77	0,63	0,52	0,53	0,48	0,45
Ocupado	0,65	0,51	0,41	0,40	0,39	0,39

Existem formas mais económicas para melhoria acústica das salas de aula com materiais diferentes dos convencionais usados na construção civil, como demonstrado por Pessoa em 2018 [22]. No seu trabalho, e com a aplicação de materiais de desperdício não orgânico como copos plásticos de café,

tabuleiros para ovos e espuma proveniente de colchões de retoma, demonstrou a possibilidade da sua aplicação para melhoria acústica de salas de aula. Para tal, Pessoa, começou por caracterizar acusticamente os materiais de estudo, obtendo em camara reverberante os coeficientes de absorção de todos os materiais de desperdício em estudo chegando aos valores que se demonstram na Figura 3.6.

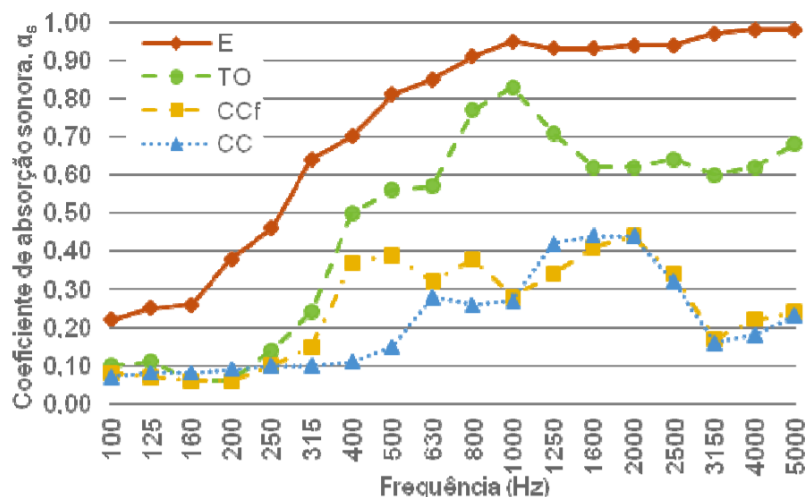


Figura 3.6 – Coeficientes de absorção sonora ( $\alpha_s$ ) dos diferentes materiais de desperdício (CC – Copos de café; CCF – Copos de café furados na base; TO – Tabuleiros para ovos; E – Espuma de colchões de retoma), em função da frequência. (adaptado de [22])

Tendo por base estes valores, Pessoa passou à aplicação prática dos materiais, experimentando diversas posições de aplicação destes materiais (a) placas de cartão pregadas na vertical na parte superior das paredes do fundo; b) placas de cartão encostadas na longitudinal à base das paredes; c) placas de cartão colocadas sobre o revestimento de piso) e avaliando o TR e ainda o RASTI. Após isso confrontou os resultados com a legislação portuguesa em vigor, não sem antes analisar as salas sem qualquer tipo de intervenção e obteve valores demonstrados nos Quadros 3.5 e 3.6. [22]

Quadro 3.6 – Valores do  $TR_{\text{médio}}$  (500-2k Hz) para as situações SV1 (sala vazia, sem intervenção) e SV2 (sala vazia com painel termo acústico e um resíduo têxtil proveniente da reciclagem de pneus aplicados na face interior da parede de fachada) e limite regulamentar em Portugal [adaptado de [22]]

Sala de aula	Volume (m <sup>3</sup> )	$TR_{\text{médio}}$ medido (500-2k Hz) (s)	Limite Regulamentar $TR \leq 0,15V^{1/3}$	TR-I (s)	Cumprimento RRAE
SV1	168	2,51	0,83	2,30	KO
SV2		1,53		1,32	KO

I, Incerteza, corresponde a 25% do limite regulamentar (cf. RRAE)

Quadro 3.7 - Valores do  $TR_{\text{médio}}$  (500-2k Hz) para todos os ensaios realizados com materiais reciclados em sala de aula. Em que a) na parte superior das paredes de fundo; b) encostadas na longitudinal à base das paredes; c) sobre revestimento de piso. (adaptado de [22])

Amostra	Posição da Amostra	$TR_{\text{médio}}$ medido (500-2k Hz) (s)	Limite Regulamentar $TR \leq 0,15V^{1/3}$	TR-I (s)	Cumprimento RRAE
Copos de café furados na base	a)	1,21	0,83	1,00	KO
	b)	1,22		1,01	KO
	c)	1,22		1,01	KO
Tabuleiros para ovos	a)	1,04		0,83	OK
	b)	1,11		0,90	KO
	c)	1,07		0,86	KO
Espumas de colchões de retoma	a)	0,94		0,73	OK
	b)	1,05		0,84	KO
	c)	1,02		0,81	OK
	a) + 22 pessoas sentadas	0,70		-	OK

I, Incerteza, corresponde a 25% do limite regulamentar (cf. RRAE)

Pessoa concluiu então que, dos materiais estudados, a espuma de colchões de retoma seria o melhor material, sendo que era algo expectável, tendo em consideração a absorção sonora do dito material, tendo ido mais longe e calculado que a área mínima para reabilitar tanto SV1 como SV2 para os valores médios ou ótimos de TR com este material seria de entre 19 a 36% da área total para a SV1 e de 28 a 45% para SV2. Com isto provou que é possível corrigir salas de aula, economicamente e com materiais de desperdício, apesar de materiais como os copos de café furados na base necessitarem de preencher cerca de 83% da área da sala para obter um TR na ordem do 0,6 s.



# 4

## LEGISLAÇÃO

### 4.1. PORTUGAL

Foi na década de 1980 que começou a surgir a primeira legislação em Portugal na área da acústica, pela mão do D. Leg. Reg 22/83/A (Açores) que visava regular os ruídos na vizinhança de edifícios escolares e hospitalares. Entretanto, muitas outras leis, decretos-lei e portarias têm vindo a aparecer, como por exemplo o DL 271/84, que devido a incómodos causados por espetáculos ao ar livre e discotecas, surge de forma a impedir essas situações impondo licenças para qualquer uma dessas atividades, que só a obteriam na “condição de ser garantido que a diferença do nível sonoro contínuo equivalente corrigido do ruído proveniente do edifício ou instalações, relativamente ao valor do nível sonoro do ruído de fundo de que é excedido, num período de referência, em 95% da duração deste ( $L(\text{índice } 95)$ ), seja inferior ou igual a 10 dB (A).”. Outra lei a aparecer na altura foi a Lei 11/87, em específico o artigo 11º, referindo que a redução da exposição ao ruído só seria obtida através da definição e aplicação de instrumentos que assegurassem a sua prevenção e controlo, salvaguardando a qualidade de vida da população.

No entanto, o mais importante da década, seria o Decreto-Lei 251/87 de 24 de junho, que aprovaria o *Regulamento Geral sobre o Ruído (RGR)*. Este decreto seria, no entanto, revogado na viragem do milénio, para dar lugar ao *Regime Legal sobre o Poluição Sonora*, que foi revogado para dar lugar, em 2007, ao *Regulamento Geral do Ruído*. Este regulamento aplica-se a atividades permanentes, assim como temporárias passíveis de causar incómodo, fixando valores limites de ruído produzidos por essas atividades, mas também estabelecendo sanções, ainda que baixas, para o seu incumprimento e também a obrigação de projetos acústicos.

Contudo, no âmbito desta dissertação é de salientar o *Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios (RRAE)*, inicialmente imposto pelo Decreto-Lei 129/2002 e mais tarde, largamente alterado pelo Decreto-Lei 96/2008 de 9 de junho (revisto pelo Decreto-Lei 95/2019 com foco nas condições acústicas de edifícios reabilitados), que se encontra em vigor desde o dia 1 de junho de 2008. O RRAE visa regular a vertente de conforto acústico no regime da edificação e consequentemente a melhoria da qualidade do ambiente acústico, e aplica-se aos seguintes tipos de edifícios:

- Habitacionais e mistos e unidades hoteleiras, no artigo 5º;
- Comerciais e de serviços, e partes similares em edifícios industriais, no artigo 6º;
- Escolares e similares, e de investigação, no artigo 7º;
- Hospitalares e similares, no artigo 8º;
- Recintos desportivos, no artigo 9º;
- Estações de transportes de passageiros, no artigo 10º;

- Auditórios e salas de grande dimensão, no artigo 10ºA.

Todavia, no âmbito desta dissertação, analisar-se-á apenas o artigo 7º, que se refere a edifícios escolares. Este artigo define parâmetros de desempenho acústico e indicadores do ruído de equipamentos e instalações. Os Quadros 4.1, 4.2 e 4.3, são adaptações do RRAE e apresentam os valores impostos pelo RRAE a respeitar em escolas.

De salientar que o RRAE, para avaliações *in situ*, destinadas a verificar o cumprimento dos requisitos acústicos dos edifícios, deverá ter em conta um fator I, de Incerteza, associado à determinação das grandezas em questão, e que toma os valores seguintes, de acordo com o parâmetro a ser medido:

- $I = -3$  dB para o  $L'_{nT,w}$ ;
- $I = +3$  dB para o  $D_{nT,w}$ ;
- $I = -25\%$  do valor regulamentar para o Tempo de Reverberação.

Quadro 4.1 – Valores mínimos do índice de isolamento sonoro a ruídos de condução aérea ( $D_{nT,w}$ ) para elementos construtivos interiores em edifícios escolares segundo o RRAE. (adaptado do quadro 7.10 do RRAE) [71]

Elementos Construtivos Interiores				
Locais Emissores \ Locais Recetores		$D_{nT,w}$ (dB) $\geq$		
		Salas de aula, de música, de professores e administrativos	Bibliotecas, gabinetes médicos	Salas polivalente, berçários
Salas de aula, de professores e administrativos		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 45*	35 50*	30 45*

\*se não houver porta

Quadro 4.2 – Valores máximo do índice de isolamento sonoro a ruídos de percussão ( $L'_{nT,w}$ ) em edifícios escolares segundo o RRAE. (adaptado do quadro 7.10 do RRAE) [71]

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

Quadro 4.3 – Valores máximo do índice do tempo de reverberação médio (500, 1k e 2k Hz) em edifícios escolares. (adaptado do quadro 7.10 do RRAE) [71]

Locais	TR médio (500, 1k e 2k Hz) (s)	
	s/ sistema de difusão de mensagens sonoras	c/ sistema de difusão de mensagens sonoras
Salas de aula, bibliotecas, salas polivalentes e refeitórios	0,15V <sup>1/3</sup>	
Ginásio	0,15V <sup>1/3</sup>	0,15V <sup>1/3</sup>

Existe outros parâmetros para os quais o RRAE define limites, como o D2m,nT,w (índice de isolamento sonoro a ruídos de condução aéreo de paredes exteriores), o LAr,nT (valores do nível de avaliação do ruído particular de equipamentos) e até mesmo o valor mínimo de absorção sonora equivalente (A), que merecem ser mencionados, mas que não se apresentam aqui os seus valores, por não serem do interesse desta dissertação.

## 4.2. REINO UNIDO

No Reino Unido, atualmente encontra-se em vigor o *Building Bulletin 93 – Acoustic design of schools: performance standards* de 2015. Este documento é uma revisão das orientações publicadas anteriormente em 2003, como as secções 2 a 7 do *Building Bulletin 93: Acoustic design of schools*, que por sua vez veio substituir as recomendações relativas a acústica dos espaços escolares presentes no *Building Bulletin 87* de 1997.

Este novo *Building Bulletin* tem com função auxiliar todos os intervenientes na construção ou reabilitação de escolas, como engenheiros e arquitetos, fornecendo indicações e orientações para o planeamento e conceção de escolas adequadas em termos acústicos. [72] São apresentados uma série de parâmetros como na legislação portuguesa, fazendo referência ao ruído de fundo, ambos índices de isolamento sonoro a ruídos de condução aérea e percussão, tempos de reverberação, STI, além de recomendações de locais de construção, visando que é importante que a escola se situe em locais não afetados por tráfego. [73]

Os Quadros 4.4 ao 4.9 são quadros adaptados do *Building Bulletin 93 – Acoustic design of schools: performance standards* para os valores propostos do tempo de reverberação, índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea e de percussão. No entanto, é de referir que, no documento oficial, são apresentados valores para tempo de reverberação para edifícios escolares novos e reabilitados. De forma a apenas ter informação de interesse a esta dissertação, serão apenas apresentados os valores para escolas reabilitadas.

Quadro 4.4 – Valores de tempo de reverberação para diversos tipos de salas em edifícios escolares. (adaptada da tabela 6 do *Building Bulletin* 93 de 2015) [72]

Tipo de sala	$T_{mf}$ (s) para edifícios escolares reabilitados
Berçário Escola Primária: salas de aula, áreas de ensino geral, salas de estudo	$\leq 0,8$
Escola Secundária: salas de aula, áreas de ensino geral, salas de estudo (individual ou coletivo), laboratórios, etc.)	$\leq 1,0$
Biblioteca	$\leq 1,2$
Ginásio / Piscina	ver quadro 4.5.
Átrios, halls de entrada, espaços de circulação não usados para o ensino	$\leq 2,0$
Cantina	$\leq 1,5$

Quadro 4.5 – Valores de tempo de reverberação para ginásios e piscinas. (adaptada da tabela 7 do *Building Bulletin* 93 de 2015) [72]

Área	$T_{mf}$ máximo (s)
$<280 \text{ m}^2$	1,5
280 a $530 \text{ m}^2$	$2,0 - ((530 - \text{Área}) / 500)$
$>530 \text{ m}^2$	2,0

Os valores mínimos de isolamento sonoro de condução aérea entre espaços são definidos pela atividade no espaço emissor e o nível de tolerância ao ruído do espaço recetor, dado pela Tabela 1 do *Building Bulletin* 93 de 2015, aqui adaptada no quadro 4.6. Na mesma tabela são apresentados os valores do nível sonoro contínuo equivalente, ponderada com o filtro A do ruído de fundo,  $LA_{eq}$ , que não é de interesse desta dissertação.

Quadro 4.6 – Classificação de diversas salas para o propósito do isolamento a sons de condução aérea em edifícios escolares reabilitados. (adaptado da tabela 1 do *Building Bulletin 93* de 2015) [72]

Tipo de sala	Classificação da sala para o propósito do isolamento a sons de condução aérea	
	Ruído no espaço emissor	Tolerância ao ruído no espaço recetor
Infantários	Elevado	Baixa
Salas de aula – escolas primárias	Médio	Baixa
Salas de aula – escolas secundárias	Médio	Baixa
Salas de aula open-plan	Médio	Média
Salas de estudo	Baixo	Baixa
Biblioteca: - zona de estudo	Baixo	Baixa
- zona de pesquisa	Médio	Média
Oficinas	Elevado	Alto
Salas polivalentes	Elevado	Baixa
Salas audiovisual	Médio	Baixa
Átrio / Corredores	Médio	Média
Ginásio	Elevado	Média
Posto médico	Baixo	Baixa
Cantina	Elevado	Alta
Salas administrativas / professores	Médio	Média
Casas de banho	Média	Alta

Quadro 4.7 – Valores mínimos do  $D_{nT,w}$  para edifícios escolares reabilitados. (adaptado da tabela 3b do *Building Bulletin 93* de 2015) [72]

Mínimo $D_{nT,w}$ (dB)		Ruído no espaço emissor			
		Baixo	Médio	Alto	Muito Alto
Tolerância ao ruído no espaço recetor	Alto	Não aplicável	30	35	45
	Médio	30	40	45	45
	Baixo	35	40	50	50

Quadro 4.8 – Valores do  $L'_{nT,w}$  para edifícios escolares remodelados. (adaptado da tabela 5 do *Building Bulletin 93* de 2015) [72]

Tipo de sala	Máximo valor de $L'_{nT,w}$ para uma escola reabilitada (dB)
Berçário	65
Escola Primária: salas de aula, áreas de ensino geral, salas de estudo	
Escola Secundária: salas de aula, áreas de ensino geral, salas de estudo (individual ou coletivo), laboratórios, etc.)	
Auditórios: Pequenos (menos de 50 pessoas)	
Grandes (mais de 50 pessoas)	
Biblioteca	
Ginásio / Piscina	
Átrios, halls de entrada, espaços de circulação não usados para o ensino	
Cantina	

Quadro 4.9 – Valores de STI (*Speech Transmission Index*) em espaços *open-plan*. (adaptado da tabela 8 do *Building Bulletin 93* de 2015) [72]

Condição	<i>Speech Transmission Index</i> (STI)
Instruções ou atividades onde ouvir é crítico – dentro do grupo	$\geq 0,6^*$
Entre grupos (durante atividades onde ouvir é crítico)	$\leq 0,3$

\* devem ser adotados valores mais elevados para alunos com dificuldades auditivas.

### 4.3. ESTADOS UNIDOS DA AMÉRICA

No ano de 2000, aparece nos E.U.A. o *Classroom Acoustics I - A resource for creating learning environments with desirable listening conditions* com finalidade para alertar todos os envolvidos, seja na construção de edifícios escolares (engenheiros, arquitetos, donos de obra, etc.) assim como os envolvidos no dia a dia do mesmo, como professores, corpo administrativo e encarregados de educação, da importância de um bom ambiente acústico no sucesso escolar.

Esta publicação, sugere que os tempos de reverberação das salas se deveria situar entre os 0,4 e os 0,6s, mencionando formas de aumentar absorção sonora nas salas de aula, ou recorrendo à redução do volume para obter os tempos de reverberação desejados. Isto sem nunca descuidar a inteligibilidade da palavra, referindo a necessidade de implementar superfícies refletoras para melhor compreensão dos alunos. No documento são apresentados tempos de reverberação adequados para cantinas e ginásios, situando-se estes no intervalo de 0,8 a 1,2 s para o primeiro e de 1,2 a 1,6 para o segundo. [74]

Contudo, a publicação, além de referir valores adequados para diversos espaços, não só para o tempo de reverberação, mas também para o NC (*Noise Criteria*) entre outros, é um auxiliar de boas práticas construtivas em escolas, dando sugestões de soluções construtivas de paredes de placa de gesso cartonado entre salas (muito usado nos EUA) e de *layouts* das salas e portas. Também sugere, com exemplos, a aplicação de absorsores suspensos em ginásios e cantinas para melhorias no tempo de reverberação.

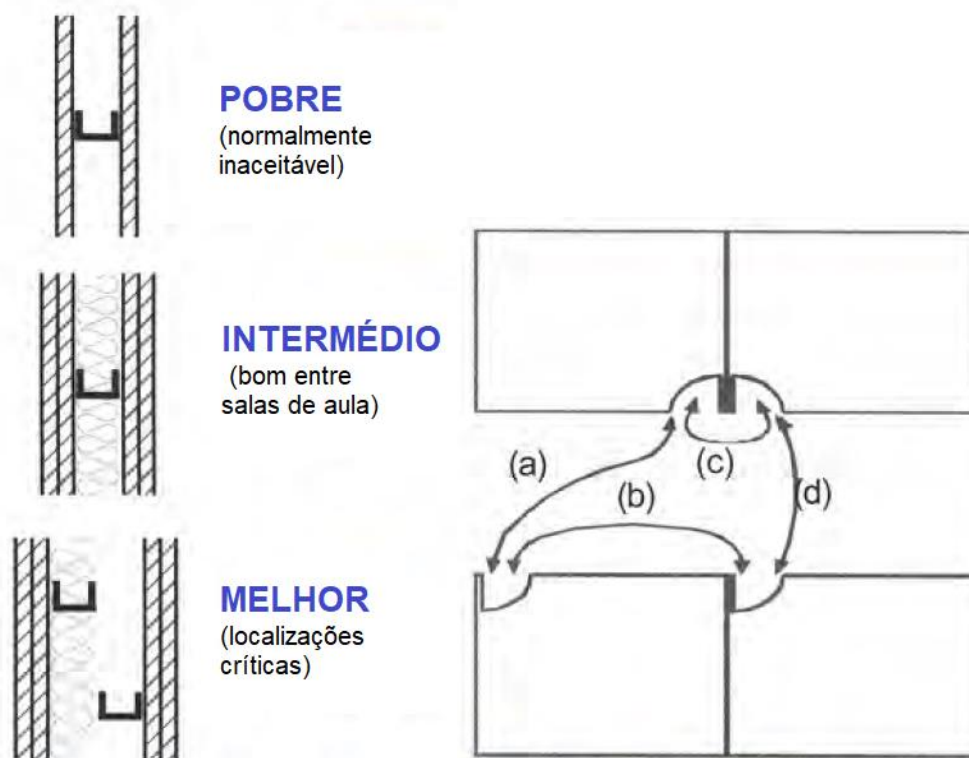


Figura 4.1 – Maus exemplos de soluções de placa de gesso cartonado a boas soluções com duas camadas de gesso cartonado, e fibra de vidro como isolamento no interior, à esquerda. À direita, localizações da porta, onde a) e b) são boas posições, enquanto c) e d) não, devido ao caminho curto entre salas. (adaptado de [74])

Em 2002 é publicada a norma ANSI 12.60, sendo que agora está em vigor a norma ANSI/ASA S12.60 de 2010, com diversas partes, destacando-se a Parte 1 com guias para escolas permanentes e a Parte 4 com padrões acústicos para ambientes de ensino. [75,76] Os Quadros 4.10 ao 4.13 são alguns dos limites expostos na norma. É de notar que esta norma, para isolamento a ruídos de condução aérea, usa o STC ou *Sound Transmission Class*, sendo que é dessa forma que expõe os valores, assim como o *Impact Insulation Class*, IIC para os ruídos de percussão. O STC é a quantidade de ruído de condução aérea bloqueado pela solução construtiva, enquanto que o IIC, é a capacidade de o piso/teto impedir ruídos de percussão de se transmitir para outros pisos.

Quadro 4.10 – Tempos de reverberação de acordo com a norma ANSI/ASA S12.60. (adaptado de [75])

Espaço de ensino	Tempo de Reverberação máximo permitido para níveis de pressão sonora nas bandas de frequência de 500/1k/2k Hz (s)
Sala de aula com volume $\leq 283 \text{ m}^3$	0,6
Sala de aula com volume $]283;566] \text{ m}^3$	0,7
Sala de aula com volume $> 566 \text{ m}^3$	s/ requisito

Quadro 4.11 – *Sound Transmission Class* mínimo requerido para paredes simples ou compostas e conjuntos piso/teto que separam salas de acordo com a norma ANSI/ASA S12.60. (adaptado de [75])

Espaço adjacente			
Sala de aula, e outros espaços que necessitam elevado nível de privacidade acústica	Casa de banho de uso geral	Corredor, escadarias, escritórios ou salas de conferência	Sala de música, auditórios, sala de equipamento mecânico, ginásio ou piscina interior
50	53	45	60

Quadro 4.12– Valores mínimos de STC entre espaços de acordo com a norma ANSI/ASA S12.60. (adaptado de [75])

Local Emissor	Corredores, escadas, casas de banho	Salas de música	Gabinetes e auditórios	Salas de máquinas, cafeteria, ginásio, piscina
Local Recetor				
Corredores	45	60	45	55
Sala de música	60	60	60	60
Gabinetes e auditórios	45	60	45	60

Quadro 4.13 – Valores mínimos de IIC de acordo com a norma ANSI/ASA S12.60. (adaptado de [75])

Local	IIC (dB)
Pisos/tetos acima de salas de aula	45*
Em edifícios existentes, se ginásios, ou outras atividades de elevado impacto estiverem localizados acima de salas de aula (dependendo do volume)	65-70

\* de preferência 50, medido sem carpetes no piso.

#### 4.4. ESPANHA

Em Espanha encontra-se em vigor o “DB-HR *Proteccion frente al ruido*, aprovado pelo Real Decreto 1371/2007 de 19 de outubro. Sofreu entretanto alterações essencialmente por erros, sendo que a última alteração realizada se encontra mencionada no Real Decreto 732/2019 de 20 de dezembro. Este Documento Básico (DB) tem como objetivo estabelecer regras que permitam cumprir exigências básicas

de proteção contra o ruído, e que a sua aplicação satisfaça os requisitos básicos e a superação dos níveis mínimos de qualidade. [77,78]

No âmbito deste documento as salas de aula são consideradas “recintos protegidos”, no entanto só apresenta valores para salas com volume inferior a 350 m<sup>3</sup>. Volumes superiores aos indicados são alvo de estudo mais detalhado, sendo que não são mencionados quaisquer valores limites.

Os Quadros 4.14, 4.15 e 4.16 são quadros-resumo dos parâmetros expostos na norma DB-HR. No entanto, como na legislação portuguesa, existe uma série de outros parâmetros indicados, mas não são de interesse para esta dissertação. De notar também, que em contraste com a legislação portuguesa, a norma espanhola usa o índice de isolamento a ruídos de condução aérea ponderada com o filtro A e, portanto, usando uma nomenclatura diferente. [78]

Quadro 4.14 – Valores de  $D_{nT,A}$  de acordo com o DB-HR. (adaptado de [78])

		$D_{nT,A} (dB) \geq$		
		Qualquer outro espaço de outra unidade de uso diferente	Zona comum	Espaço de instalações ou atividades
Local Emissor	Locais Recetores			
	“Recintos protegidos”	50*	50*	55

\* se partilharem portas e janelas: RA da porta e janela > 30 dBA e RA da parede > 50 dBA

Quadro 4.15 – Valores máximos de  $L'_{nT,w}$  de acordo com o DB-HR. (adaptado de [78])

		$L'_{nT,w} (dB) \leq$		
		Qualquer outro espaço de outra unidade de uso diferente	Zona comum	Espaço de instalações ou atividades
Local Emissor	Locais Recetores			
	“Recintos protegidos”	65	65	60

\* não aplicável entre “recintos protegidos” e escadarias em zona común

Quadro 4.16 – Tempos de reverberação máximos de acordo com o DB-HR. (adaptado de [78])

Local	TR máximo (500/1k/2k Hz) (s)
Sala de aula ou conferência, sem ocupação ou mobiliário ( $V \leq 350 \text{ m}^3$ )	0,7
Sala de aula ou conferência, sem ocupação, mas com mobiliário ( $V \leq 350 \text{ m}^3$ )	0,5
Restaurantes e cantinas vazias	0,9

#### 4.5. BRASIL

No Brasil, é a Associação Brasileira de Normas e Técnicas que é responsável pela normalização no país. Atualmente encontram-se em vigor a NBR 10151 e a NBR 10152. Enquanto que a NBR 10151 (Acústica – Avaliação do ruído em aéreas habitadas, visando ao conforto da comunidade – Procedimento) tem como finalidade estabelecer as condições mínimas para a quantificação da intensidade sonora num espaço [79] e a NBR 10152 tem como objetivo estabelecer os limites a fixar para se obter espaços acusticamente são. [80] No entanto, na NBR 10152 apenas são mencionados os níveis de ruído para conforto acústico e nada se menciona sobre tempos de reverberação, sendo que para estes, são normalmente usados valores referenciados, como por exemplo, pela Organização Mundial de Saúde (OMS). [81]

De forma meramente demonstrativa, apresentam-se no Quadro 4.17, os valores referenciados pela NBR 10152 para alguns espaços escolares, onde o valor mais baixo do intervalo representa o nível sonoro para conforto, enquanto o superior apresenta o nível sonoro aceitável.

Quadro 4.17 – Limite de níveis sonoros em diversos espaços escolares brasileiros de acordo com a NBR 10152. (adaptado de [81])

Local	Valores dB(A)
Bibliotecas, salas de música e desenho	35 - 45
Sala de aula e laboratórios	40 - 50
Espaços de circulação	45 - 55
Pavilhões fechados para atividades desportivas	45 - 60

#### 4.6. AUSTRÁLIA

Na Austrália é o *Australia Standard/New Zealand Standard 2107:2016*, ou *AS/NZS 2107:2016*, que se encontra em vigor. Esta norma apenas apresenta recomendações para ruídos de fundo para salas de aula desocupadas, assim como tempos de reverberação (que deverão ser inferiores a 0,4-0,5 s). Contudo estes valores raramente são cumpridos ou obtidos. [82,83]

Daí surgiu, através da *Association of Australasian Acoustical Consultants (AAAC)*, um guia para edifícios escolares. Este documento aparece devido à preocupação dos membros pela falta de regulação em todos os parâmetros que englobam a qualidade acústica em escolas. Inicialmente pela versão 1.0 de 2010, e recentemente alterada pela versão 2.0, em vigor desde 2018. [84]

Os quadros que se seguem são adaptados do *Guideline for Educational Facilities* da AAAC. Apresentam os valores propostos apenas para tempo de reverberação e os limites dos índices de isolamento sonoro, sendo estes os únicos de interesse no âmbito desta dissertação, para edifícios de Classe 9b, onde se encontram as escolas primárias e secundárias, assim como laboratórios e outros. [84]

Quadro 4.18 – Tempos de reverberação máximo de acordo com a AAAC: *Guideline for Educational Facilities* V2.0. (adaptado de [84])

Local	TR máximo (s)
Átrios (de circulação)	≤ 1,5
Corredores	≤ 0,8
Ginásio	*
Salas administrativas	0,6 – 0,8
Salas de aula – escolas primárias	≤ 0,6
Salas de aula – escolas secundárias	≤ 0,6

\* o tempo de reverberação adequado deve ser determinado de acordo com o uso, volume e geometria do espaço. Sugere-se seguir as recomendações de um engenheiro acústico.

Quadro 4.19 – Requisitos de isolamento a ruídos de condução aérea e sons de percussão de acordo com a AAAC: *Guideline for Educational Facilities* V2.0. (adaptado de [84])

Local	Isolamento Sonoro		
	Nível de ruído de impacto produzido na sala emissora	Nível de ruído de condução aérea produzido na sala emissora	Tolerância do espaço recetor
Átrios (de circulação)	Médio	Médio	Alta
Corredores	Médio	Médio	Alta
Ginásio	Alto	Muito Alto	Média
Laboratórios: para ensino	Baixo	Médio	Média
para pesquisa	Baixo	Médio	Média
Biblioteca: área de estudo	Baixo	Baixo	Baixa
área de pesquisa	Médio	Médio	Média
Salas administrativas	Baixo	Médio	Média
Salas de aula – escolas primárias	Baixo	Médio	Baixa
Salas de aula – escolas secundárias	Baixo	Médio	Baixa

Quadro 4.20 – Valores mínimos de isolamento a ruídos de condução aérea,  $D_w$  de acordo com a AAAC: *Guideline for Educational Facilities V2.0.* (adaptado de [84])

Mínimo $D_w$ (dB)	Ruído de atividade do espaço emissor				
		Baixo	Médio	Alto	Muito Alto
Tolerância na sala receptora	Alto	30	35	40	45
	Médio	35	40	45	50
	Baixo	40	45	50	55
	Muito Baixo	45	50	55	60

Quadro 4.21 – Valores máximos de isolamento a ruídos de percussão,  $L_{nT,w}$  de acordo com a AAAC: *Guideline for Educational Facilities V2.0.* (adaptado de [84])

Máximo $L_{nT,w}$ (dB)	Ruído de atividade do espaço emissor			
		Baixo	Médio	Alto
Tolerância na sala receptora	Alto	70	65	60
	Médio	65	60	55
	Baixo	60	55	50*
	Muito Baixo	55	50*	45*

\* quando um espaço emissor de elevado ruído se encontrar por cima de uma sala de baixa tolerância ao ruído, a prioridade deverá passar por recolocar as salas



# 5

## CARACTERIZAÇÃO DO CASO DE ESTUDO

### 5.1. HISTÓRIA

O nascimento da instituição que é agora a Escola Secundária Dr. Serafim Leite, começou a ganhar forma em 1957, quando uma comissão de sanjoanenses se deslocou a Lisboa para solicitar ao Ministro da Educação da altura, a criação de uma Escola Técnica Industrial em S. João da Madeira. A criação da escola, apesar de já prevista no Decreto-Lei nº 36409 de 11 de janeiro de 1947, só dez anos mais tarde aconteceu. Com uma população com cerca de 11 mil habitantes graças a uma forte e próspera indústria (na base do calçado, chapelaria e metalurgia, que continuam nos dias de hoje), eram o fator essencial que faltava para a sua existência.

No início de 1958 foi publicado o diploma que criou a Escola Industrial de S. João da Madeira, inicialmente apenas com o Ciclo Preparatório, uma vez que as instalações existentes na altura, não asseguravam o funcionamento de todas as atividades.

No ano de 1971, começou a transferência para o edifício atual, começando inicialmente com a secção de Mecânica e de seguida os restantes setores. No ano letivo de 1977/78 a Escola Industrial passa a ser Escola Secundária nº 1 e em 1987 passou a designar-se Escola Secundária Serafim Leite (ESSL), em homenagem ao padre Serafim Soares Leite.

No ano letivo de 1983/84 dá-se a expansão pedagógica que permitiu o funcionamento do primeiro Curso Técnico de Instalações Elétricas, seguindo-se outros cursos. Em 2014 a Escola Secundária Serafim Leite, junta-se a outras escolas da cidade constituindo o Agrupamento de Escolas Serafim Leite mantendo uma oferta formativa extensiva, desde Educação Pré-Escolar a cursos para adultos. [85]

### 5.2. A ESCOLA

A escola é constituída por diversos edifícios. Da construção inicial faz parte o bloco principal (Figura 5.1) onde, além de diversas salas de aulas (inclusive a sala que é alvo de estudo desta dissertação), é onde se encontram os gabinetes do conselho administrativo da escola e a papelaria, o edifício onde se encontra o ginásio e a cantina, e as denominadas oficinas onde são lecionadas grande parte das aulas dos cursos técnicos da formação educativa existente na escola. Este bloco e os espaços envolventes, encontravam-se encerrados devido a obras a decorrer na escola aquando da realização desta dissertação (Figuras 5.2 e 5.3). Estas obras contemplam a construção de “*um novo volume de três pisos*” assim como requalificação das oficinas existentes, como indica a memória descritiva do projeto elaborado por técnicos da Câmara Municipal de São João da Madeira. [86]

Entre o bloco principal e o bloco das oficinas existe um edifício mais recente, onde se encontram a biblioteca, auditório e bar da escola. Existem outros espaços envolventes da escola, como o campo de jogos exterior, tanto de futebol, como basquetebol e voleibol assim como espaços para a prática de atividades ao ar livre. De referir ainda, que com as fotos aéreas, foi possível detetar uma recente requalificação da cobertura exterior, tanto do edifício principal como do edifício da cantina/ginásio.



Figura 5.1 – Fachada da Escola Secundária Serafim Leite. [fotografia do autor]



Figura 5.2 – Fotografia aérea da Escola Secundária Serafim Leite. Orientação Norte-Sul. [fotografia do autor]



Figura 5.3 – Fotografia aérea da Escola Secundária Serafim Leite- Orientação Sul-Norte [fotografia do autor]

### 5.3. ESPAÇOS EM ESTUDO

#### 5.3.1. SALA 9

A sala 9, que é grande parte da análise desta dissertação, é uma sala de aula tipo na ESSL. Tem uma área de  $7,76 \times 6,90 \text{ m}^2$  e um pé direito de  $3,17 \text{ m}$  perfazendo um volume de  $170 \text{ m}^3$ . Não apresenta qualquer tipo de tratamento acústico visível no teto, nem no piso, sendo este de tacos de madeira. A porta de acesso é uma simples porta de madeira, as paredes são rebocadas com duas grandes janelas envidraçadas para o exterior com  $1,93 \times 2,40 \text{ m}^2$  cada, espaçadas entre si por menos de  $50 \text{ cm}$ . Existem também vidros fixos na face oposta, orientada para o corredor de acesso (este com cerca de  $3 \text{ metros}$  de largura), desde a altura da porta até a  $20 \text{ cm}$  do teto.

A sala, além de dois quadros na parede (um interativo e uma ardósia), tem  $24$  mesas e  $24$  cadeiras para alunos, além da secretária e cadeira para o docente. A sala contém em toda a extensão de duas paredes,  $12$  computadores completos (computador, écrans, teclados e ratos) dispostos por  $9$  secretárias e  $12$  cadeiras orientadas para esses mesmo computadores. À direita da porta de acesso, tem também um pequeno móvel. Tudo isto pode ser verificado nas Figuras 5.4, 5.5 e 5.6.



Figura 5.4 – Disposição da sala 9 da Escola Secundária Serafim Leite. [fotografia do autor]



Figura 5.5 – Disposição da sala 9 da Escola Secundária Serafim Leite. [fotografia do autor]



Figura 5.6 – Disposição da sala 9 da Escola Secundária Serafim Leite. [fotografia do autor]

### 5.3.2. CANTINA

A cantina, que se encontra no mesmo edifício do ginásio, é um espaço com 7,30 metros de largura e 23,50 metros de comprimento e um pé direito de aproximadamente 3,10 metros, o que corresponde a um volume de aproximadamente 532 m<sup>3</sup>. Aquando das medições, ao lado da porta de acesso, tinha uns pequenos móveis de madeira. Em toda a extensão da parede orientada a Sul, além de duas portas de acesso em ao exterior, em cada extremidade com 1,80 metros de largura, tem também quatro janelas de vidro simples com a mesma largura. Perto do teto e por cima de todas as aberturas para o exterior, existem também pequenas janelas. Além disto, na zona perto da copa, existe um grande portão de garagem.

É constituída por cerca de 56 mesas e 56 cadeiras, em quatro filas espaçadas por pouco mais de meio metro entre si. As mesas agrupadas em pares, encontravam-se separadas por acrílico, como método de prevenção ao COVID-19. Tudo isto pode ser visualizado nas Figuras 5.7 e 5.8.



Figura 5.7 – Disposição da cantina da Escola Secundária Serafim Leite. [fotografia do autor]



Figura 5.8 – Disposição da cantina da Escola Secundária Serafim Leite. [fotografia do autor]

### 5.3.3 GINÁSIO

O ginásio, é constituído por duas zonas distintas, mas sem qualquer tipo de separação do ponto de vista acústico: o recinto para prática desportiva e um palco. Ambos espaços têm uma largura de cerca de 15,36 metros, sendo que o palco tem um comprimento de 11,96 metros e o recinto um comprimento de 27,70 metros. A cobertura do ginásio é em duas águas, sendo que no centro tem o pé direito mais elevado com 8,40 metros e na zona mais baixa o pé direito é 6,80 metros. Tem um volume total de 4630 m<sup>3</sup>.

Do lado sul, o ginásio tem uma série de portas e janelas com 3,60 de largura e 2,15 de altura. Na parede oposta uma série de espaldares. O único elemento construtivo que separa o palco do recinto é uma abertura com 4,90 metros de altura de 8,50 de largura. Do lado esquerdo desta abertura existe uma passagem, que é a zona de acesso ao balneário feminino, como se pode verificar nas Figuras 5.9 e 5.10.



Figura 5.9 – Ginásio da Escola Secundária Serafim Leite. [fotografia do autor]

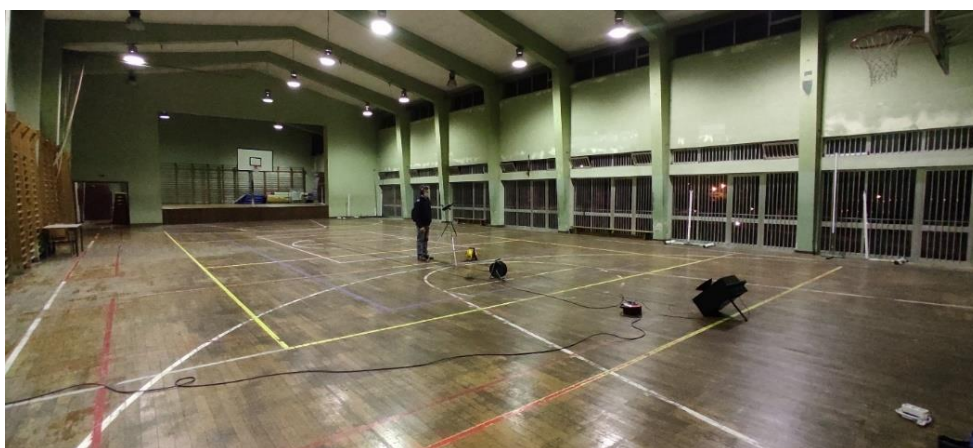


Figura 5.10 – Ginásio da Escola Secundária Serafim Leite, aquando da medição do tempo de reverberação. [fotografia do autor]

# 6

## ENSAIOS

### 6.1. METODOLOGIA

Para a caracterização acústica dos espaços da Escola Secundária Serafim Leite foram avaliados os seguintes parâmetros:

- Tempo de reverberação;
- Isolamento sonoro a ruídos de condução aérea entre salas e entre sala/corredor;
- Isolamento sonoro a ruídos de percussão;
- RASTI.

De mencionar que se optou por não se executar medições para o isolamento sonoro a ruídos de condução aérea por fachadas e de isolamento sonoro a ruídos de condução aérea entre pisos por falta de tempo e de oportunidade para efetuar mais medições no local, assim como não se avaliaram os níveis de pressão sonora do ruído por equipamentos de ventilação, pela inexistência destes nas salas de aula.

As medições foram efetuadas no dia 3 de dezembro de 2020 entre as 18h e as 21h30.

### 6.2. TEMPO DE REVERBERAÇÃO

#### 6.2.1. MÉTODO

Para a medição dos valores de tempo de reverberação, foi utilizado um sonómetro *Brüel & Kjør*, modelo 2260 e uma fonte sonora *Brüel & Kjør*, modelo 4224, seguindo as recomendações da norma EN ISO 3382 [87]. Em todos os espaços onde este parâmetro foi avaliado, os dois equipamentos encontravam-se conectados, uma vez que o ruído emitido seria interrompido por ordem do sonómetro. Na sala de aula a fonte sonora foi colocada no local normalmente ocupado pelo professor, enquanto que na cantina e no ginásio a mesma fonte sonora foi colocada perto das entradas de ambos os espaços.

A fonte sonora, emite um ruído e o sonómetro regista o tempo de decaimento do ruído de 20 e 30 dB, apresentando, no fim, os valores são extrapolados para um decaimento de 60 dB. Este parâmetro foi medido por banda de frequência de 1/3 oitava em três pontos distintos na sala de aula e na cantina, enquanto que no ginásio foi medido em quatro pontos distintos, devido às dimensões do espaço e pela existência de um palco além do recinto como se pode visualizar nas Figuras 6.1, 6.2 e 6.3. Em cada um desses pontos foram feitas duas medições: com o sonómetro sempre semi-orientado para a fonte sonora, mas com um ângulo de 45° entre as duas medições para captar o maior número possível de reflexões.

Todos os pontos onde foram feitas as medições formam uma diagonal em relação ao eixo dos espaços como se pode ver nas Figuras 6.1, 6.2 e 6.3.

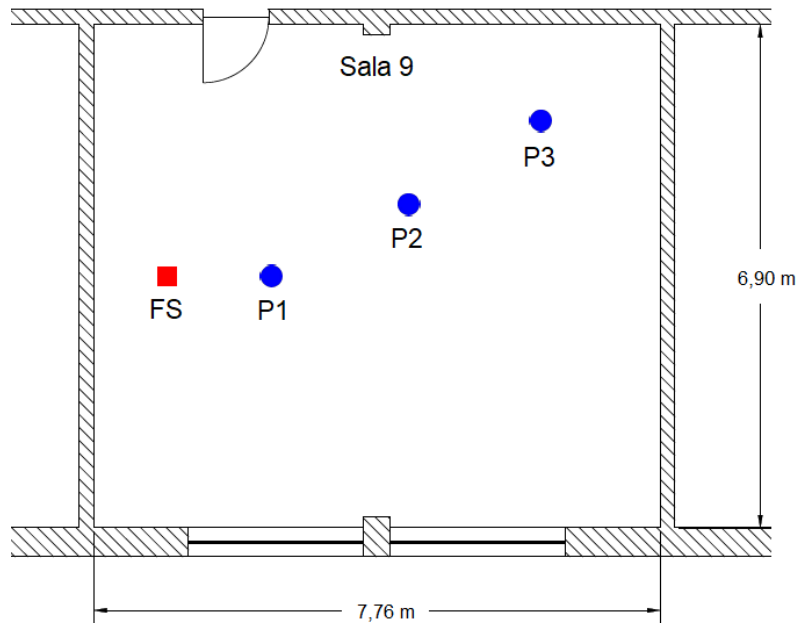


Figura 6.1 – Esquema sem escala da posição da fonte sonora (FS) e dos pontos de medição (P1, P2 e P3) para determinação do tempo de reverberação na Sala 9 da Escola Secundária Serafim Leite.

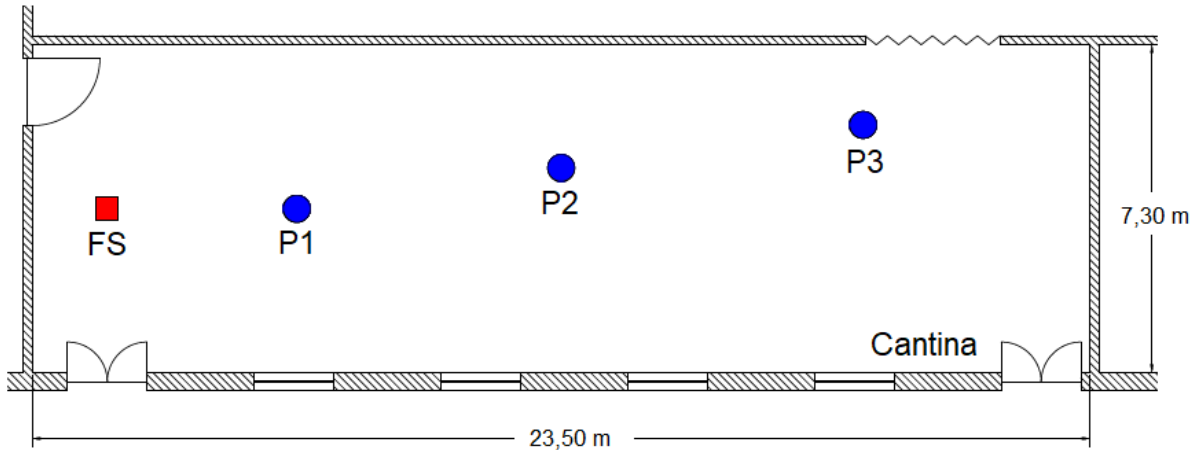


Figura 6.2 – Esquema sem escala da posição da fonte sonora (FS) e dos pontos de medição (P1, P2 e P3) para determinação do tempo de reverberação na Cantina da Escola Secundária Serafim Leite.

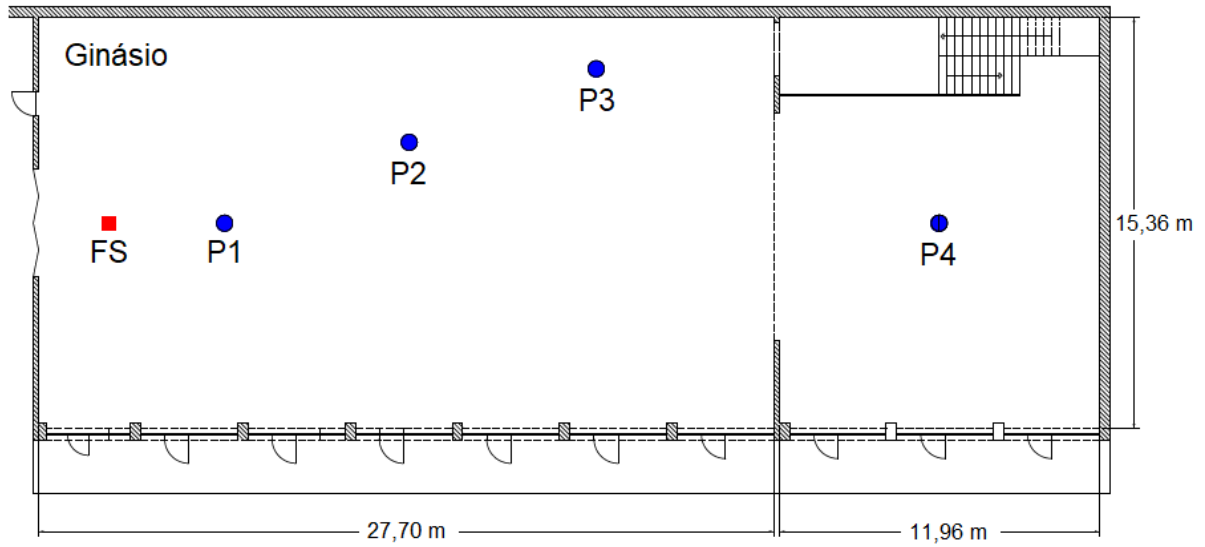


Figura 6.3 – Esquema sem escala da posição da fonte sonora (FS) e dos pontos de medição (P1, P2, P3 e P4) para determinação do tempo de reverberação no Ginásio da Escola Secundária Serafim Leite.

#### 6.2.2. RESULTADOS

Nos Quadros 6.1, 6.2 e 6.3 encontram-se os valores dos tempos de reverberação para os espaços da ESSL por banda de 1/3 oitava para o T30. De acordo com o Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios (RRAE), apenas as frequências de 500, 1000 e 2000 Hz são usadas para a sua verificação, sendo que para o cálculo do TR a comparar foram usados apenas esses valores.

Quadro 6.1 – Tempo de reverberação para a Sala 9 da Escola Secundária Dr. Serafim Leite.

TR por banda 1/3 de oitava					TR por banda de oitava	
Frequência (Hz)	Ponto 1 (s)	Ponto 2 (s)	Ponto 3 (s)	Média 3 Pontos (s)	Frequência (Hz)	TR
100	1,59	2,08	1,98	1,88	125	1,92
125	1,55	1,98	2,11	1,88		
160	1,88	2,11	1,99	1,99		
200	1,56	1,93	1,71	1,73	250	1,48
250	1,15	1,45	1,58	1,39		
315	1,34	1,28	1,29	1,30		
400	1,33	1,27	1,21	1,27	500	1,22
500	1,18	1,15	1,41	1,25		
630	1,03	1,25	1,15	1,14		
800	1,03	1,13	1,11	1,09	1000	1,08
1000	1,05	1,05	1,16	1,09		
1250	1,04	1,01	1,12	1,06		
1600	1,03	1,08	1,12	1,08	2000	1,10
2000	1,11	1,09	1,09	1,10		
2500	1,12	1,11	1,13	1,12		
3150	1,08	1,06	1,12	1,09	4000	1,01
4000	1,01	1,00	1,06	1,02		
5000	0,91	0,92	0,92	0,92		
TR médio (500, 1000 e 2000 Hz) (s)					<b>1,13</b>	
TR médio – I (s)					<b>0,92</b>	
Limite Máximo RRAE					<b>0,83</b>	
Cumprimento Legal					<b>Não cumpre</b>	

Quadro 6.2 – Tempo de reverberação para a Cantina da Escola Secundária Dr. Serafim Leite.

TR por banda 1/3 de oitava					TR por banda de oitava	
Frequência (Hz)	Ponto 1 (s)	Ponto 2 (s)	Ponto 3 (s)	Média 3 Pontos (s)	Frequência (Hz)	TR
100	2,72	3,04	3,08	2,95	125	2,67
125	2,49	2,46	2,43	2,46		
160	2,37	2,65	2,80	2,61		
200	2,24	2,35	2,52	2,37	250	2,31
250	2,18	2,12	2,17	2,16		
315	2,28	2,54	2,36	2,39		
400	2,31	2,48	2,67	2,49	500	2,68
500	2,57	2,66	2,85	2,69		
630	2,83	2,67	3,05	2,85		
800	2,58	2,71	2,90	2,73	1000	2,68
1000	2,66	2,68	2,83	2,72		
1250	2,50	2,51	2,80	2,60		
1600	2,51	2,44	2,64	2,53	2000	2,43
2000	2,39	2,35	2,54	2,43		
2500	2,30	2,33	2,36	2,33		
3150	2,17	2,20	2,27	2,21	4000	1,93
4000	1,86	1,96	2,01	1,94		
5000	1,58	1,64	1,72	1,65		
TR médio (500, 1000 e 2000 Hz) (s)					<b>2,60</b>	
TR médio – I (s)					<b>2,30</b>	
Limite Máximo RRAE					<b>1,22</b>	
Cumprimento Legal					<b>Não cumpre</b>	

Quadro 6.3 – Tempo de reverberação para o Ginásio da Escola Secundária Dr. Serafim Leite.

TR por banda 1/3 de oitava						TR por banda de oitava	
Frequência (Hz)	Ponto 1 (s)	Ponto 2 (s)	Ponto 3 (s)	Ponto 4 (s)	Média 4 Pontos (s)	Frequência (Hz)	TR
100	5,65	5,12	6,23	6,20	5,80	125	5,69
125	7,89	6,15	6,05	5,14	6,31		
160	5,50	5,11	4,60	4,59	4,95		
200	3,80	3,96	3,85	3,60	3,80	250	3,49
250	3,13	3,23	5,37	3,09	3,71		
315	3,06	2,87	3,08	2,77	2,95		
400	3,26	3,72	3,48	3,56	3,51	500	4,14
500	3,95	4,28	4,32	4,17	4,18		
630	4,69	4,69	4,70	4,87	4,74		
800	4,79	4,87	4,92	5,00	4,90	1000	5,02
1000	5,10	5,00	5,07	5,48	5,16		
1250	4,97	4,94	4,90	5,21	5,01		
1600	4,68	4,54	4,53	4,71	4,61	2000	4,12
2000	4,06	5,04	4,16	4,18	4,12		
2500	3,57	3,58	3,67	3,67	3,62		
3150	2,95	3,11	3,07	3,06	3,05	4000	2,55
4000	2,53	2,51	2,54	2,52	2,53		
5000	2,05	2,09	2,06	2,11	2,08		
TR médio (500,1000 e 2000 Hz) (s)						<b>4,43</b>	
TR médio – I (s)						<b>3,80</b>	
Limite Máximo RRAE						<b>2,50</b>	
Cumprimento Legal						<b>Não cumpre</b>	

### 6.2.3. DISCUSSÃO DE RESULTADOS

A Figura 6.4, apresenta os valores do tempo de reverberação por banda de frequência de 1/3 de oitava dos três espaços letivos da ESSL onde foi medido este parâmetro. A Figura 6.5 apresenta os mesmos tempos de reverberação, mas para bandas de frequência de 1/1 oitava.

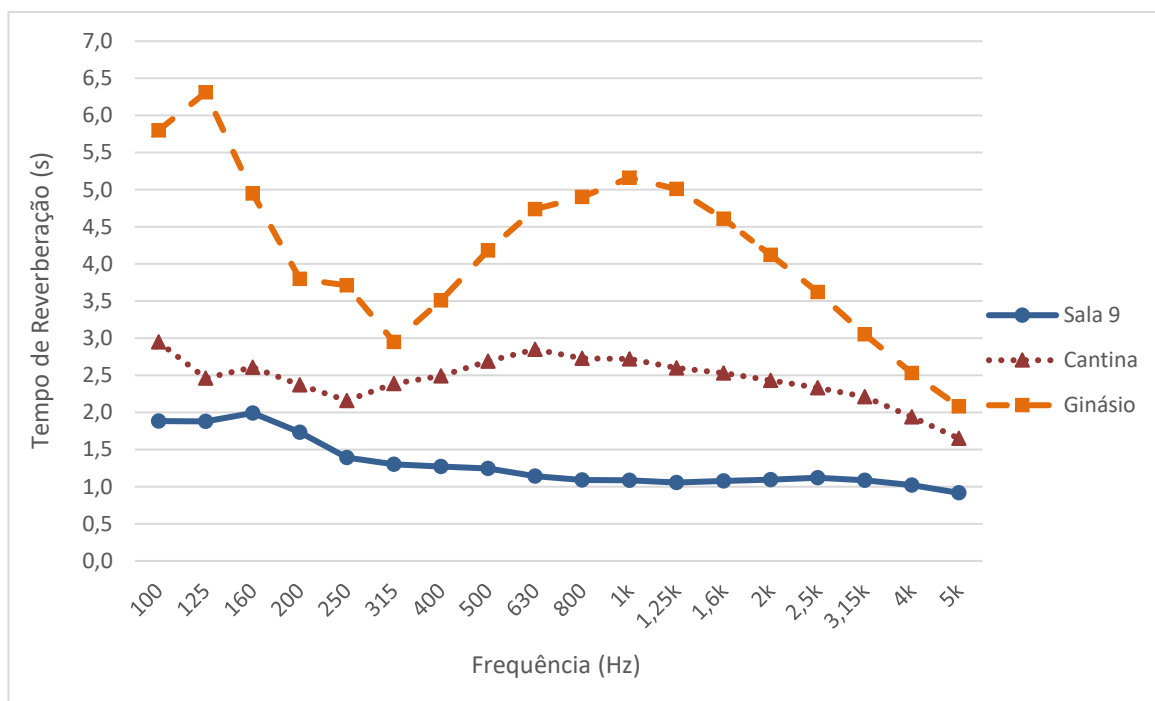


Figura 6.4 – Valores de tempo de reverberação por banda de frequência de 1/3 de oitava dos três espaços letivos da ESSL analisados.

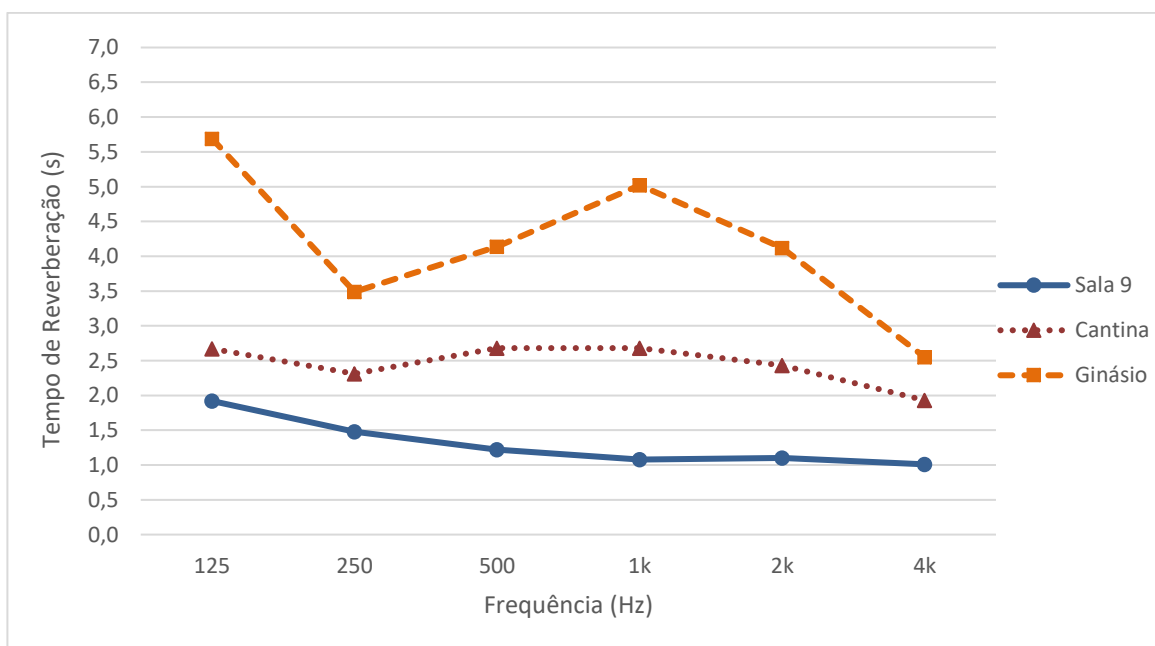


Figura 6.5 – Valores de tempo de reverberação por banda de frequência de oitava dos três espaços letivos da ESSL analisados.

Como foi mencionado noutros capítulos, o tempo de reverberação tem um grande papel no bom funcionamento tanto da sala de aula como de espaços amplos e ruidosos, como é o caso de cantina e do ginásio. Evita-se assim que estes espaços se tornem incomodativos, permitindo a transmissão eficaz da palavra.

Numa sala de aula, para uma boa compreensão da palavra, considera-se que o tempo de reverberação ideal deverá estar compreendido no intervalo de 0,6 a 0,8 s para as frequências dos 500 e dos 1000 Hz. Analisando a Figura 6.4, composto pelos valores do Quadro 6.1., rapidamente se verifica que o tempo de reverberação não se aproxima dos valores ideais em qualquer instância do espectro, sendo esta situação ainda pior para as baixas frequências. O facto de o tempo de reverberação estar afastado dos valores ideais, poderá ter influência na inteligibilidade da palavra, ainda mais quando este tempo de reverberação é um pouco pior para as baixas frequências. Como foi mencionado no subcapítulo 2.5.1., as vogais, que são predominantemente de baixas frequências, “ficam no ar” mais tempo, e consequentemente sobrepõem-se às consoantes, dificultando a compreensão da palavra. [88]

Hamayon, na publicação denominada *Réussir l'acoustique d'un bâtiment*, após análise de valores dos parâmetros acústicos regulamentares em França, expôs que os valores de tempo de reverberação médio (das frequências de 500 /1k /2k Hz) para cantinas com volume superior a 250 m<sup>3</sup> deverá ser sempre inferior a 1,2 s. Tendo em conta isto, pode-se concluir que o TR da cantina da ESSL encontra-se com valores muito acima do recomendado. [58]

No que toca ao ginásio, é de conhecimento geral que são espaços muito ruidosos, pelo que o TR deveria situar-se entre 1,0 e 1,8 s ou, como defendido por Zamarrenõ *et al.* dentro do intervalo de 1,2 a 2,2 s. No entanto, para o caso em estudo e sem surpresas, esses valores estão longe de se verificar, visto que o ginásio em questão tem uma volumetria muito elevada e não tem qualquer tipo de tratamento acústico visível, e o que torna a obtenção dos valores ideais para ginásios propostos por Zamarrenõ *et al.* e Nijs *et al.*, difíceis de alcançar. Ainda assim, em comparação com os outros espaços, nota-se que o ginásio tem um pico baixo de TR nas baixas frequências, talvez devido ao piso de madeira. [60,66]

#### 6.2.4. CUMPRIMENTO DO RRAE

O Quadro 6.4 é o quadro resumo da verificação dos valores impostos pelo RRAE para os diversos espaços analisados.

Quadro 6.4 – Quadro resumo do cumprimento do tempo de reverberação do RRAE.

Elemento	TR médio (s) [500;1k;2k (Hz)]	TR – I (=25%) (s)	Volume (m <sup>3</sup> )	Imposição legal $T \leq 0,15V^{1/3}$ (s)	Art. 7º - 1 d) Dec. Lei nº 96/2008
Sala 9	1,13	0,92	170	0,83	KO
Cantina	2,60	2,30	532	1,22	KO
Ginásio	4,43	3,80	4630	2,50	KO

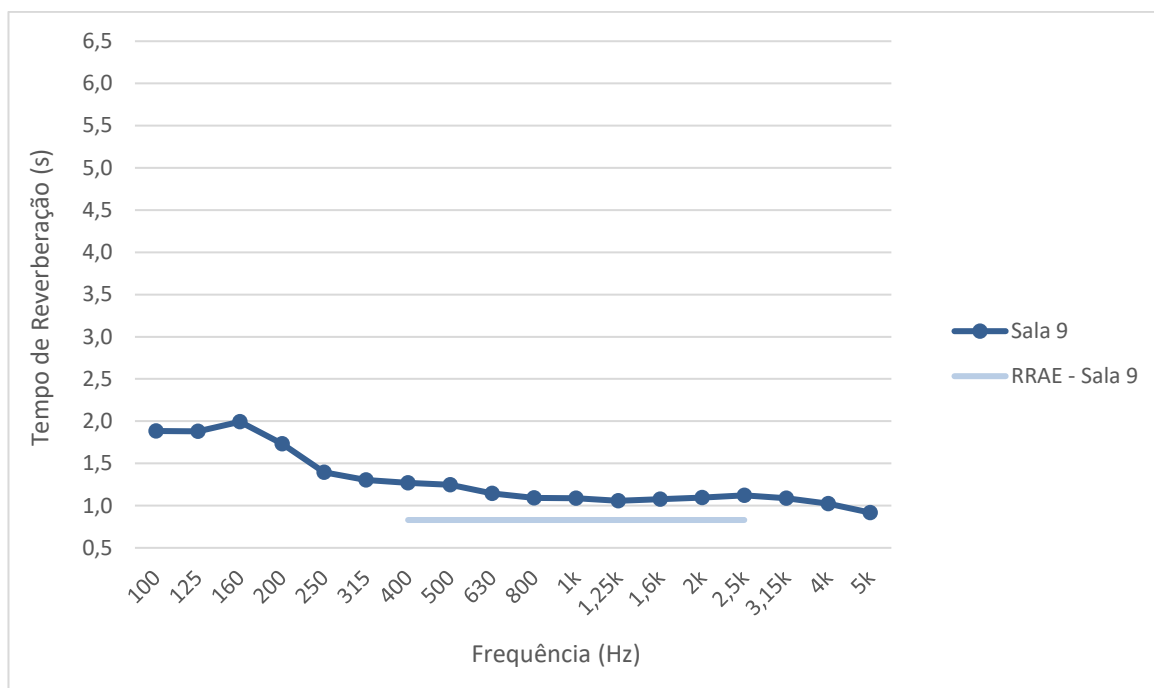


Figura 6.6 – Valores de tempos de reverberação em banda de frequência de 1/3 de oitava na Sala 9 e respetiva imposição do RRAE.

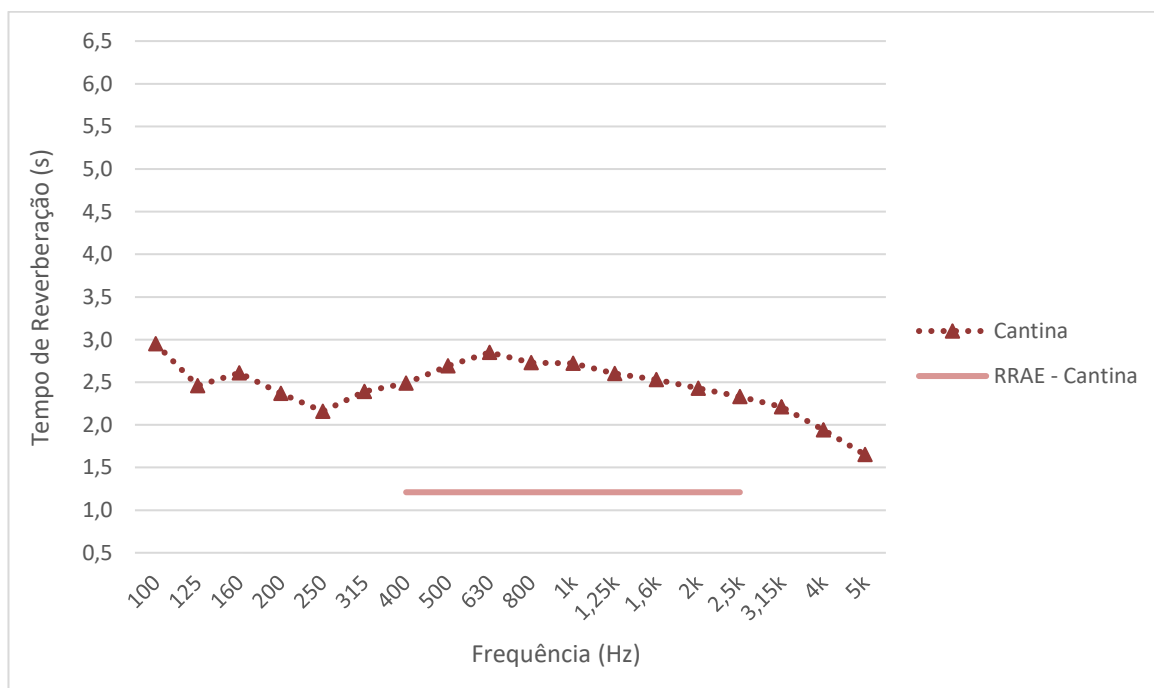


Figura 6.7 – Valores de tempos de reverberação em banda de frequência de 1/3 de oitava na Cantina e respetiva imposição do RRAE.

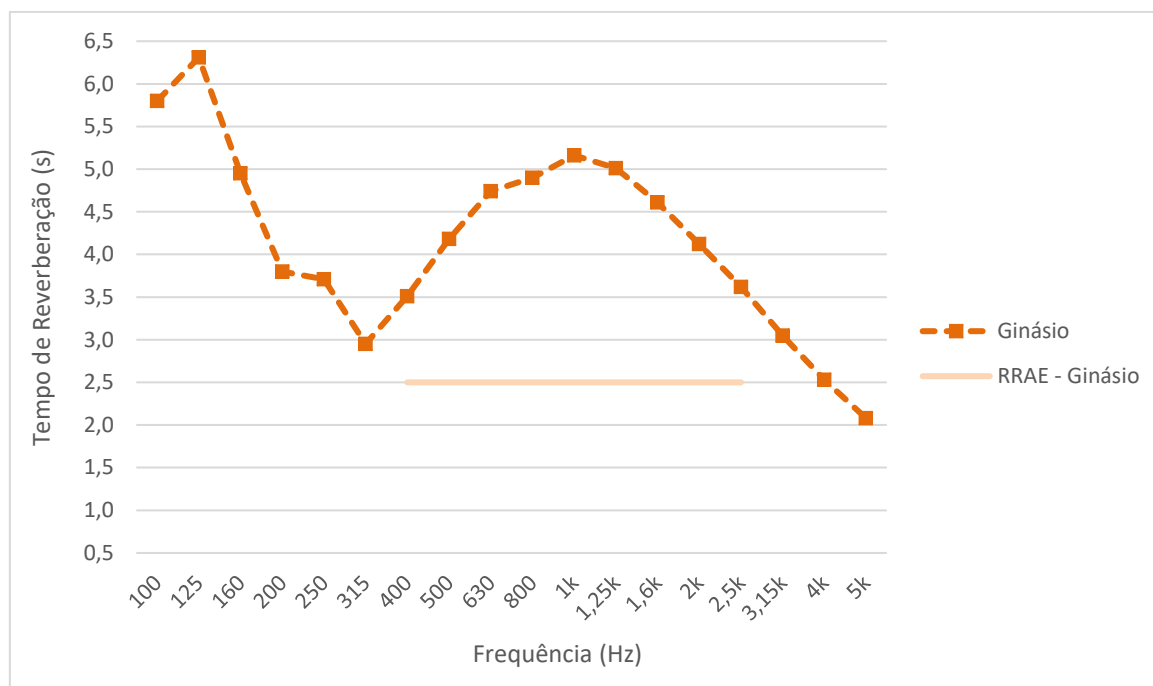


Figura 6.8 – Valores de tempos de reverberação em banda de frequência de 1/3 de oitava no Ginásio e respetiva imposição do RRAE.

Como se pode constatar no Quadro 6.4, assim como nas Figuras 6.6, 6.7 e 6.8 que apresentam o tempo de reverberação do espaço e o limite do tempo de reverberação imposto pelo RRAE, em nenhuma das situações é cumprido.

### 6.3. ISOLAMENTO SONORO A RUÍDOS DE CONDUÇÃO AÉREA

#### 6.3.1. MÉTODO

A medição deste parâmetro foi realizada com base no ensaio descrito na norma NP EN ISO 140-4 [89], alterada pela ISO 16283-1:2014 [90], utilizando como fonte sonora um *Brüel & Kjær*, modelo 4224, e um sonómetro *Brüel & Kjær*, modelo 2260 como demonstra as Figuras 6.9 e 6.10.



Figura 6.9 e 6.10 - *Brüel & Kjær*, modelo 4224 e *Brüel & Kjær*, modelo 2260, usado nas medições. [fotografias do autor]

O emissor, ou fonte sonora, foi colocado em duas posições na sala emissora (FS1 e FS2) a cerca de 1 metro do fundo da sala e da parede. Para cada posição do emissor foram medidos, em cinco pontos (P1, P2, P3, P4, P5 da Figura 6.11.), os níveis de pressão sonora por banda de frequência de 1/3 de oitava, e o mesmo no compartimento recetor (P'1, P'2, P'3, P'4 e P'5 na Figura 6.11.) perfazendo um total de 20 pontos medidos (10 pontos no emissor e 10 no recetor).

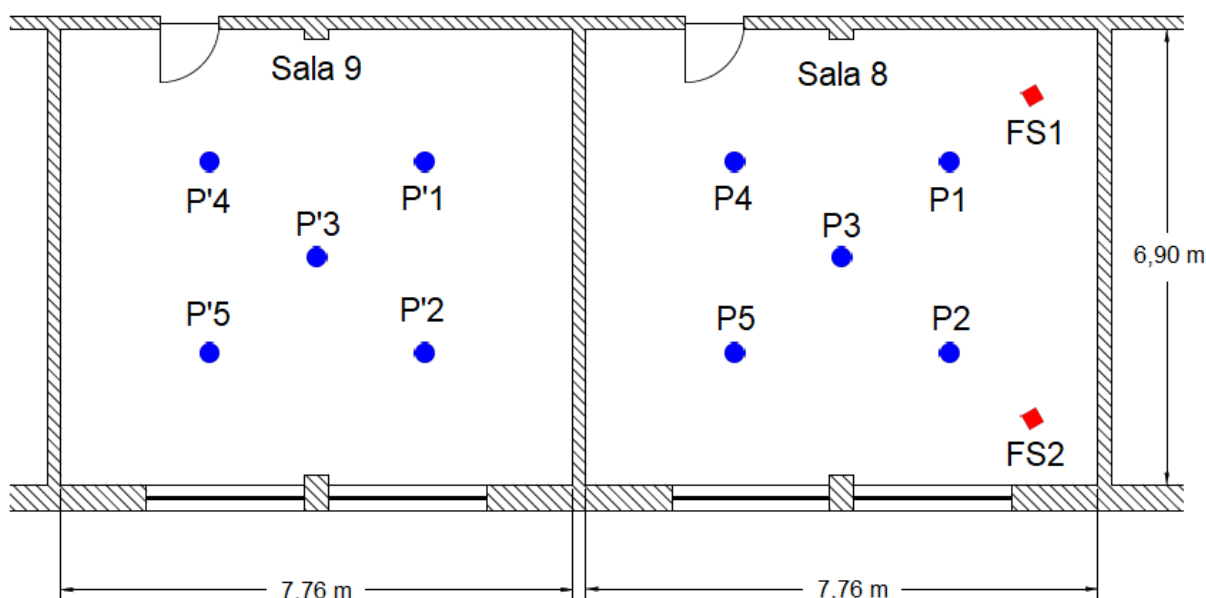


Figura 6.11 – Esquema sem escala da posição da fonte sonora (FS1 e FS2) e dos pontos de medição (P1, P2, P3, P4 e P5) no compartimento emissor (sala 8, à direita) assim como posição dos pontos de medição (P'1, P'2, P'3, P'4 e P'5) no compartimento recetor (sala 9, à esquerda) para obtenção dos níveis de pressão sonora para determinação do isolamento sonoro a ruídos de condução aérea.



Figura 6.12 – Disposição Sala 8 da Escola Secundária Serafim Leite. [fotografia do autor]

Tal como foi feito entre salas, um método análogo foi realizado para obtenção dos níveis de pressão sonora entre o corredor (Figura 6.13) e a sala 9. O emissor foi colocado em dois pontos distintos (FS1 e FS2 da Figura 6.14) do corredor: um ponto em frente à porta da sala e outro mais ao fundo da sala. Procedeu-se então à medição dos níveis de pressão sonora por banda de frequência de 1/3 de oitava

em cinco pontos no corredor (P1, P2, P3, P4, P5 da Figura 6.14) e em cinco pontos da sala (P'1, P'2, P'3, P'4 e P'5 na Figura 6.14) para cada posição do emissor, perfazendo um total de 20 pontos.



Figura 6.13. – Corredor de acesso à sala 9. [fotografia do autor]

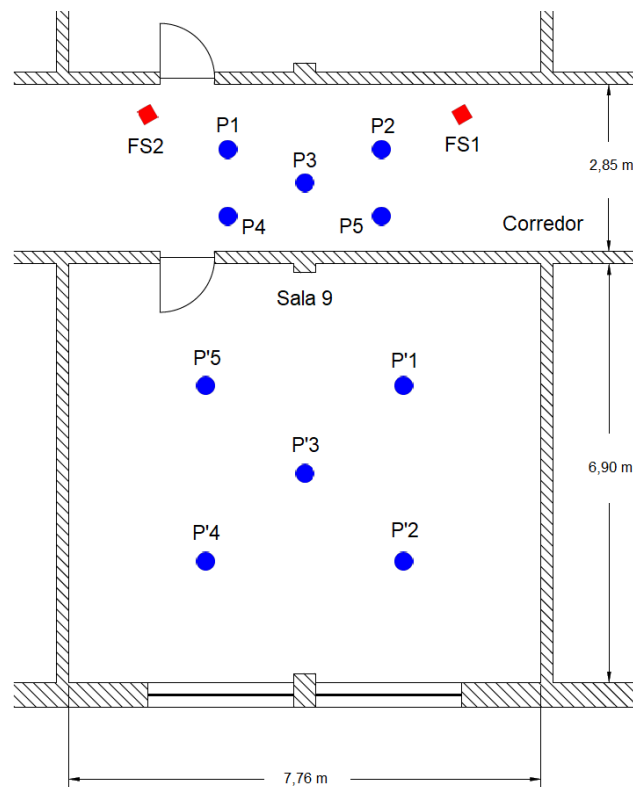


Figura 6.14 – Esquema sem escala da posição da fonte sonora (FS1 e FS2) e dos pontos de medição (P1, P2 e P3, P4) no compartimento emissor (corredor) assim como posição dos pontos de medição (P'1, P'2, P'3, P'4 e P'5) para obtenção dos níveis de pressão sonora para determinação do isolamento sonoro a ruídos de condução aérea.

## 6.3.2. RESULTADOS

Os Quadros 6.5 e 6.6 apresentam os valores dos níveis de pressão sonora médios por banda de frequência de 1/3 de oitava, necessários para a avaliação do isolamento sonoro a ruídos de condução aérea padronizado, para a situação entre as salas 8 e 9, assim como entre o corredor e a sala 9.

Quadro 6.5 – Níveis de pressão sonora médios na sala 8 (emissora) e 9 (recetora) para determinação do isolamento sonoro a ruídos de condução aérea.

Frequência (Hz)		100	125	160	200	250	315	400	500
L (dB)	Emissor	85,7	87,9	88,6	84,9	85,0	86,4	88,5	89,4
	Recetor	56,3	59,1	57,9	53,8	50,9	51,1	51,3	50,1
Frequência (Hz)		630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150
L (dB)	Emissor	91,2	86,4	82,3	82,5	83,0	84,1	84,8	78,8
	Recetor	50,4	47,3	46,1	40,5	40,9	45,5	43,5	37,1

Quadro 6.6 – Níveis de pressão sonora médios no corredor (emissor) e na sala 9 (recetor) para determinação do isolamento sonoro a ruídos de condução aérea.

Frequência (Hz)		100	125	160	200	250	315	400	500
L (dB)	Emissor	82,5	83,6	81,4	81,1	82,3	82,9	84,1	86,5
	Recetor	63,1	68	66,2	64,3	62,6	64,1	66,6	67,7
Frequência (Hz)		630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150
L (dB)	Emissor	88,3	83,9	80,3	80,7	81,2	82,6	82,6	77,0
	Recetor	70,3	65,3	61,4	60,5	61,7	63,8	64,0	56,5

Usando a expressão 2.23., apresentada no subcapítulo 2.4.2., para cada frequência da banda de 1/3 de oitava, e sabendo o tempo de reverberação da sala 9 para essas mesmas frequências obtidas no subcapítulo anterior, é possível estimar o índice de isolamento sonoro a ruídos de condução aérea, também com auxílio, à curva de valores de referência exposta na Figura 2.12. Esses valores encontram-se expostos no Quadro 6.7.

Quadro 6.7 – Resultado do índice de isolamento sonoro a ruídos de condução aérea, padronizado,  $D_{nT,w}$ , entre salas.

Elemento Separador	$D_{nT,w}$ (dB)
Parede Divisória Sala 8/Sala 9	<b>44</b>
Parede Divisória Corredor/Sala 9	<b>23</b>

### 6.3.3. DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Na figura 6.15, estão apresentados os valores do isolamento sonoro a ruídos de condução aérea padronizado,  $D_{nT}$ , nas bandas de frequência de 1/3 de oitava para os dois casos em que foi medido.

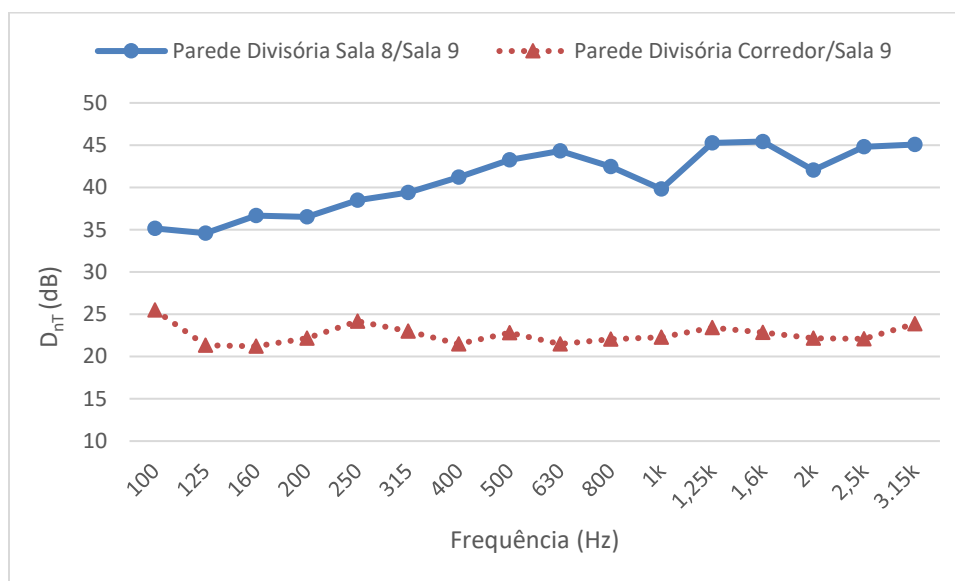


Figura 6.15 – Isolamento sonoro a ruídos de condução aérea padronizado,  $D_{nT}$  (dB), por banda de frequência de 1/3 de oitava em duas paredes da ESSL.

Como se pode visualizar, o isolamento sonoro entre o corredor e a sala 9, é basicamente constante em toda a extensão de frequências, variando no máximo cerca de 4 dB, enquanto que para os valores da parede divisória entre salas há uma variação maior, chegando a haver uma diferença de 10 dB. Além disso os valores de isolamento entre o corredor e a sala 9, são ligeiramente baixos, por si só, assim como bastante mais baixos em relação à parede divisória entre salas. Enquanto que a parede da sala 8/sala 9 é uma parede simples de alvenaria rebocada, sem qualquer abertura, a parede que separa a sala 9 do corredor, como já foi mencionado, tem uma boa parte de zona envidraçada (ver figura 5.5.), que por natureza é um dos materiais de construção com menor redução sonora. Isto, aliado ao facto de a porta de acesso à sala não ter qualquer tipo de tratamento, como existência de vedantes de borracha, por exemplo, é justificativo da diferença do índice de isolamento das duas soluções.

### 6.3.4. CUMPRIMENTO DO RRAE

O Quadro 6.8 é o quadro resumo da verificação dos valores impostos pelo RRAE para o índice de isolamento sonoro a ruídos de condução aérea

Como se pode visualizar, a exigência de limites do RRAE entre as duas soluções é bastante diferente, sendo muito mais exigente em elementos construtivos entre salas, por provavelmente assumir a inexistência de portas ou janelas entre estas, sendo que entre o corredor e a sala de aula existirá sempre acessos. Apesar disso, a parede divisória entre as duas salas é a única a cumprir o RRAE, enquanto que a parede que separa o corredor e a sala não o faz. Como foi mencionado no subcapítulo anterior, esta solução, tem uma série de envidraçados e uma porta sem qualquer tipo de tratamento, fazendo com que a diferença de níveis de pressão entre os dois espaços (corredor e sala 9) fosse muito pouco e, portanto, demonstrando ser uma solução pouco viável.

Quadro 6.8 - Quadro resumo do cumprimento do  $D_{nT,w}$  do RRAE.

Elemento	$D_{nT,w}$ (dB)	$D_{nT,w} + l$ (dB)	Imposição legal (dB)	Art. 7º - 1b) Dec. Lei nº 96/2008
Parede divisória Sala 8/Sala 9	44	47	≥ 45	OK
Parede Divisória Corredor/Sala 9	23	26	≥ 30	KO

## 6.4. ISOLAMENTO SONORO A RUÍDOS DE PERCUSSÃO

### 6.4.1. MÉTODO

Para a medição deste parâmetro, foi realizado através de ensaios de pavimento sob ação de uma percussão normalizada, como descrito na NP EN ISO 140-7 [91], alterada pela ISO 16283-2:2020 [92], utilizando uma máquina de impactos normalizada *Brüel & Kjær*, modelo 3204 (Figura 6.16) e um sonómetro *Brüel & Kjær*, modelo 2260. (Figura 6.10).



Figura 6.16 – Máquina de impactos normalizada *Brüel & Kjær*. [fotografia do autor]

A máquina de percussão normalizada percute ao pavimento 10 choques por segundo, causados por cinco martelos de 500 g cada, que caem de uma altura de 4 cm sobre o pavimento/elemento em ensaio, simulando, ou produzindo, uma espécie de “sapateado”. [91,92] Este “sapateado” normalizado permite avaliar unicamente o ruído do piso inferior.

O equipamento foi colocado em quatro posições diferentes no compartimento emissor na sala 16 (Figura 6.17), enquanto que na sala recetora (sala 9), imediatamente abaixo, foram medidos os níveis de pressão sonora. Para cada posição da máquina de percussão normalizada, foram feitas quatro medições na sala recetora, perfazendo um total de 16 pontos medidos. As posições estão ilustradas nas Figuras 6.18 e 6.19.



Figura 6.17 – Disposição da sala 16 da Escola Secundária Serafim Leite [fotografia do autor]

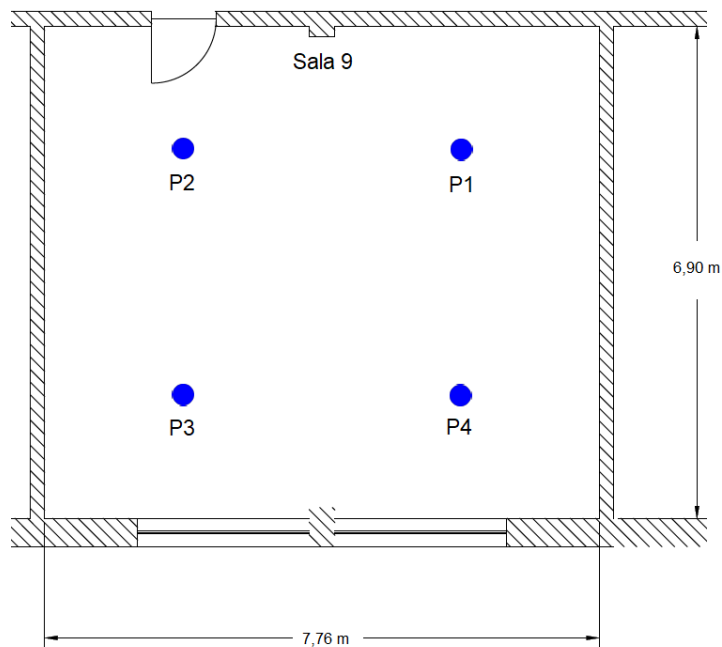


Figura 6.18 – Esquema sem escala da posição dos pontos P1, P2, P3, P4 para determinação dos níveis de pressão sonora para a determinação do isolamento sonoro a ruídos de percussão na Sala 9.

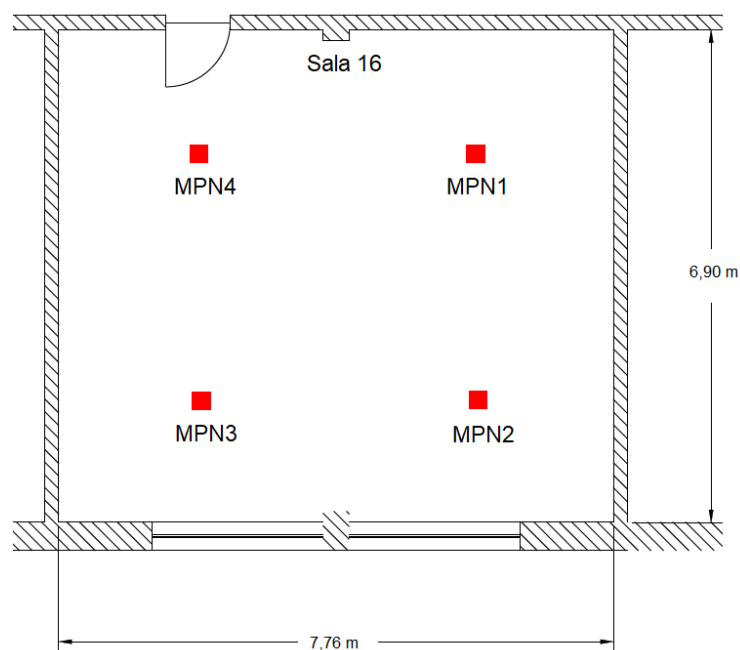


Figura 6.19 – Esquema sem escala das diversas posições da máquina de percussão normalizada (MPN1, MPN2, MPN3 e MPN4) na sala 16.

#### 6.4.2. RESULTADOS

O Quadro 6.9. apresenta os níveis de pressão sonora médios por banda de frequência de um terço de oitava na sala 9 quando do funcionamento da máquina de percussão normalizada na sala 16.

Usando a expressão 2.26., demonstrada no subcapítulo 2.4.3., para cada frequência da banda de 1/3 de oitava, e sabendo o tempo de reverberação da sala 9 para essas mesmas frequências obtidas no subcapítulo anterior, é possível estimar o índice de isolamento sonoro a ruídos de percussão padronizado, também com auxílio, à curva de valores de referência exposta na Figura 2.14. O resultado encontra-se no quadro 6.10.

Quadro 6.9. – Níveis de pressão sonora médios na sala 9 para determinação do isolamento sonoro a ruídos de percussão.

Frequência (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500
L (dB) Recetor	58,0	60,7	63,2	62,7	62,7	65,3	65,8	65,8
Frequência (Hz)	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150
L (dB) Recetor	65,2	64,0	65,9	66,4	64,9	61,0	56,2	53,4

Quadro 6.10. – Resultado do índice de isolamento sonoro a ruídos de percussão,  $L'_{nt,w}$ .

Elemento Separador	$L'_{nt,w}$ (dB)
Laje entre Sala 9/Sala 16	64

### 6.4.3. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Na Figura 6.20, estão apresentados os valores do isolamento sonoro a ruídos de percussão padronizado,  $L'_{nT}$ , por bandas de frequência de 1/3 de oitava para a laje entre a sala 9 e a sala 16.

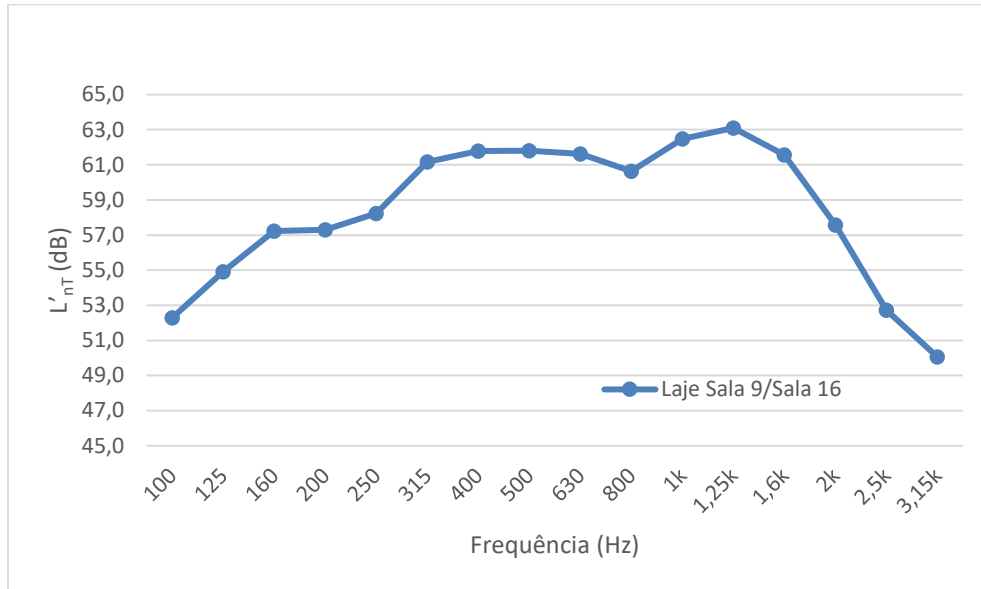


Figura 6.20 –  $L'_{nT}$  (dB) por banda de frequência de 1/3 de oitava para a laje entre a sala 9 e a sala 16 da Escola Secundária Serafim Leite.

Como se pode verificar, o isolamento sonoro a ruídos de percussão é pior nas frequências da gama central. Como o  $L'_{nT}$  é resultante do nível de pressão sonora no compartimento recetor, quanto maior forem os valores de  $L_i$ , maior será o primeiro e, portanto, menor o isolamento. No caso da laje em estudo, pode-se facilmente perceber, com a ajuda da Figura 6.20 que a laje existente isola melhor nas baixas e altas frequências que nas médias

### 6.4.4. CUMPRIMENTO DO RRAE

A laje analisada no âmbito desta dissertação, como se pode verificar no Quadro 6.11, cumpre a legislação em vigor, e, portanto, não há nada a assinalar.

Quadro 6.11. - Quadro resumo do cumprimento do  $L'_{nT,w}$  do RRAE.

Elemento	$L'_{nT,w}$ (dB)	$L'_{nT,w} - I$ (dB)	Imposição legal (dB)	Art. 7º - 1 c) Dec. Lei nº 96/2008
Laje Sala 9/ Sala 16	64	61	≤ 65	OK

## 6.5. RASTI

### 6.5.1. MÉTODO

Para a medição do parâmetro RASTI, o emissor foi colocado num ponto fixo à frente da sala, onde normalmente se encontrará o professor. A partir dessa posição registou-se o RASTI em quatro posições distintas da sala (como demonstrado na Figura 6.21), à altura que os recetores (alunos neste caso) estarão aquando das aulas. Os 4 pontos foram colocados na 1ª e 3ª fila de mesas, sendo que em cada uma dessas filas mediu-se na posição central e na mesa mais distante do emissor. Através da tabela de conversão da Norma IEC 268-16 [37], já demonstrada no subcapítulo 2.5.2. pode-se fazer corresponder os valores de RASTI a uma escala subjetiva de inteligibilidade da palavra.

Para a obtenção deste parâmetro foram usados aparelhos de medição *Briel & Kjaer*, nomeadamente o transmissor modelo 4225 e o recetor modelo 4419.

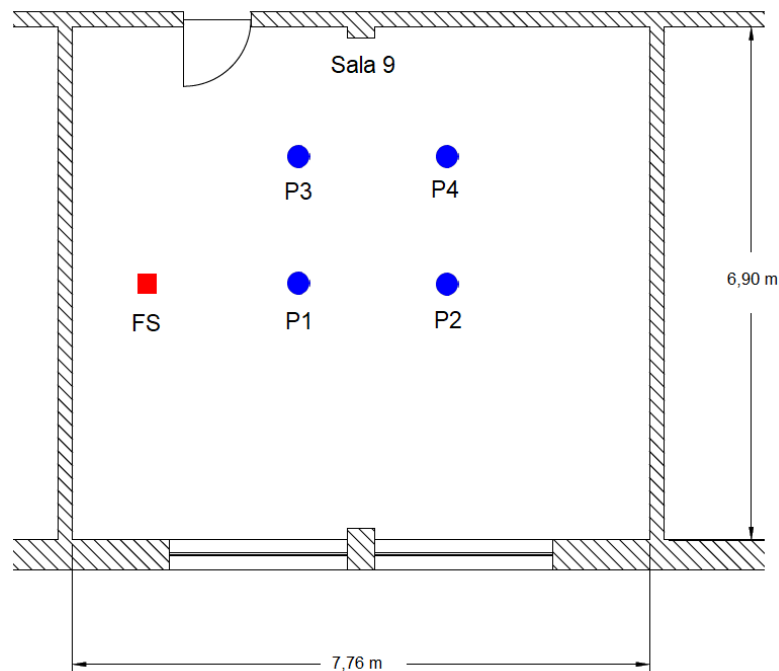


Figura 6.21 – Esquema sem escala da localização da fonte sonora (FS) e dos pontos de medição do RASTI (P1, P2, P3 e P4) na sala 9.



Figura 6.22 e 6.23 – À esquerda, transmissor *Brüel & Kjær* modelo 4225, e à direita o recetor *Brüel & Kjær* modelo 4419 para medição de RASTI [fotografias do autor]

### 6.5.2. RESULTADOS

O Quadro 6.12 apresenta os valores de RASTI de acordo com a metodologia explicada atrás, no subcapítulo 6.5.1. As medições foram efetuadas no dia 3 de dezembro de 2020, já depois das 21h de modo a ter a escola o mais desocupada possível e conseqüentemente um ambiente mais silencioso.

Quadro 6.12 – Valores das medições RASTI para a Sala 9.

Posição	Medição 1	Medição 2	Medição 3	Medição 4	Distância aproximada à fonte (m)	Média	Média Global
1	0,64	0,64	0,64	0,64	2,0	0,64	0,58
2	0,56	0,55	0,56	0,56	4,0	0,56	
3	0,57	0,58	0,58	0,57	2,6	0,58	
4	0,55	0,54	0,55	0,55	4,5	0,55	

### 6.5.3. DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Como seria de esperar, os valores do RASTI, para os quatro pontos onde foi medido, por norma, decrescem com o aumento da distância à fonte. Como se pode verificar no gráfico da Figura 6.24, existe uma clara tendência de os valores baixarem com essa mesma distância. Porém, os valores da Posição 2 e 3 são muito semelhantes. Isto deve-se à direccionalidade da fonte. Apesar da Posição 3 se encontrar mais próxima da fonte que a Posição 2, esta encontra-se bastante lateralizada, fazendo com que ambos os pontos acabem por ter um nível médio de inteligibilidade idêntico.

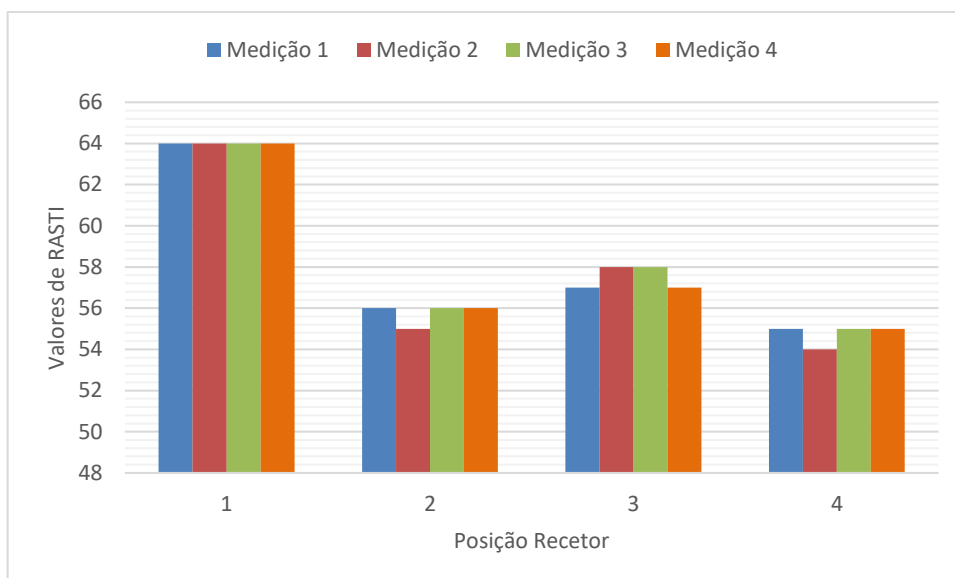


Figura 6.24 – Valores de RASTI da Sala 9, com as posições de medição dos valores por ordem crescente de distância à fonte.

Confrontando os valores obtidos *in situ*, com a tabela de conversão da Norma IEC 268-16, deparamos que a sala 9 da ESSL, tem valores de RASTI *suficientes*, e até mesmo *bons*, para posições mais próximas à fonte. A Figura 6.25 demonstra de forma simplificada e esquemática, linhas de igual RASTI para a sala de aula. Apesar disso, a média fica abaixo dos valores de 0,6 recomendáveis para salas de aula.

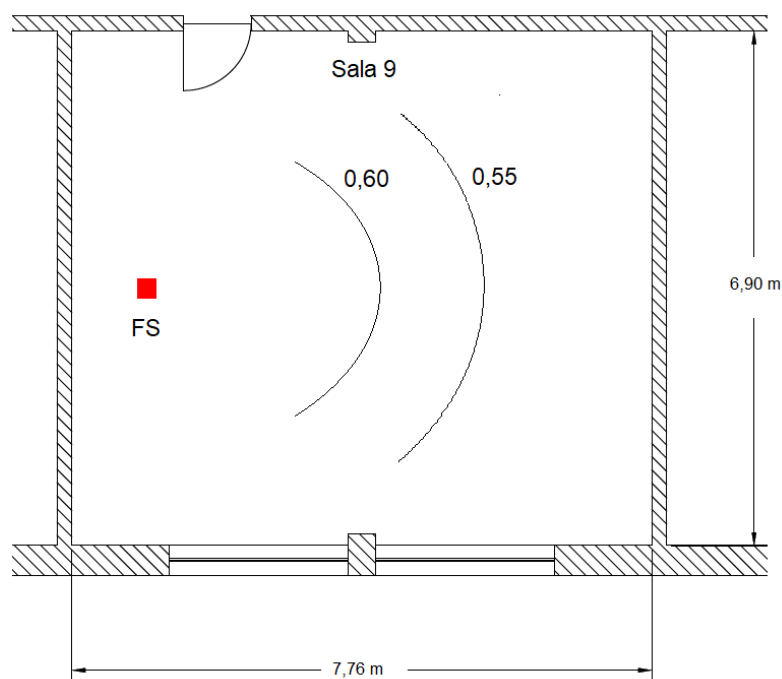


Figura 6.25 – Forma esquemática de linhas de igual RASTI para a Sala 9 da Escola Secundária Serafim Leite. (esquema sem escala)



## 7

## O EFEITO DA ACÚSTICA

## 7.1. COMPARAÇÃO COM A ESCOLA SECUNDÁRIA DE GONDOMAR

## 7.1.1. COMPARAÇÃO

Ao mesmo tempo que esta dissertação estava a ser realizada, também a dissertação “Caracterização Acústica da Escola Secundária de Gondomar”, de Nuno Couto, estava a ser concluída. Tendo as duas escolas bastantes semelhanças e com a contrapartida que a Escola Secundária de Gondomar (ESG) ser uma escola intervencionada em 2010 no âmbito do programa “Parque Escolar E.P.E.”, que visa recuperar e modernizar os edifícios escolares foi do interesse do autor, fazer uma breve comparação dos parâmetros acústicos analisados em ambas as escolas. O Quadro 7.1, é um quadro resumo dos valores comparáveis entre ambas.

## 7.1.2. TEMPO DE REVERBERAÇÃO

Uma análise do Quadro 7.1, permite verificar que os tempos de reverberação das duas salas que foram alvo de estudo da ESG são cerca de metade, com uma diferença de cerca de 0,6 s, em comparação à ESSL, e sem surpresa a sala com maior volume da ESG tem um tempo de reverberação ligeiramente superior à sala mais pequena. Ainda assim a sala de maior volume da ESG ( $V=209\text{ m}^3$ ) tem um tempo de reverberação inferior à sala 9 ESSL.

Como já foi referido ao longo desta dissertação, as salas de aula da ESSL não apresentam qualquer tipo de tratamento acústico. No entanto, a ESG, para obter valores de TR tão baixos, dentro da gama do ideal, conseguiu-o com melhorias acústicas, que passou pela aplicação de um teto falso e material absorvente sonoro.

A cantina da ESG também apresenta um TR de menos de metade que a cantina da ESSL, em cerca de 1,4 s, e o TR do ginásio da ESSL chega a ser mais de três vezes superior ao ginásio D (de igual volumetria) com uma diferença de aproximadamente 3,0 s da ESG. No ginásio D da ESG, tratado acusticamente pela “Parque Escolar E.P.E.”, todas as paredes deste foram revestidas com *sound blocks* e o teto todo revestido com *K13*, ambos bastante absorventes, e que o ginásio da Escola Secundária Serafim Leite não tem qualquer tratamento. Para conseguir o desempenho que se verifica na cantina da ESG, esta levou um tratamento semelhante às salas de aula, com rebaixamento do pé direito para aplicação de um teto falso com material absorvente no seu interior.

Quadro 7.1 – Quadro de comparação entre a Escola Secundária de Gondomar (c/ tratamento acústico) e a Escola Secundária Serafim Leite (s/ tratamento acústico).

ESG C/ Tratamento Acústico		ESSL S/ Tratamento Acústico		RRAE
Tempo de Reverberação				TR (s)
Sala a1.10 [V=128 m <sup>3</sup> ]	0,49 s	Sala 9 [V=170 m <sup>3</sup> ]	1,13 s	Sala a1.10 ≤ 0,76 Sala 9 ≤ 0,83
Sala b0.11 [V=209 m <sup>3</sup> ]	0,62 s			Sala b0.11 ≤ 0,89
Cantina [V=1152 m <sup>3</sup> ]	1,24 s	Cantina [V=532 m <sup>3</sup> ]	2,60 s	ESG ≤ 1,57 ESSL ≤ 1,22
Ginásio B [V=2563 m <sup>3</sup> ] 2,17		Ginásio [V=4630 m <sup>3</sup> ]	4,43	Ginásio B ≤ 2,05 Ginásio ESSL ≤ 2,50
Ginásio D [V=4452 m <sup>3</sup> ] 1,40				Ginásio D ≤ 2,47
RASTI				
Sala a1.10 [V=128 m <sup>3</sup> ]	0,76	Sala 9 [V=170 m <sup>3</sup> ]	0,58	(recomendável) ≥ 0,60
Sala b0.11 [V=209 m <sup>3</sup> ]	0,73			
Índice de Isolamento Sonoro a Ruídos de Condução Aérea				D <sub>nT,w</sub>
Parede entre Sala 1.09/a1.10 51 dB		Parede entre Sala 8/Sala 9 44 dB		≥ 45 dB
Índice de Isolamento Sonoro a Ruídos de Percussão				L' <sub>nT,w</sub>
Laje s/ iso- lamento	57 dB	Laje entre Sala 16/Sala 9	64 dB	≤ 65 dB
Laje c/ iso- lamento	50 dB			

### 7.1.3. ÍNDICES DE ISOLAMENTO SONORO

Olhando para o Quadro 7.1, verifica-se que a ESG está melhor preparada acusticamente para a não transmissão de ruído aéreo entre salas. Apesar de as paredes divisórias entre salas (como foi analisado entre a sala 8 e sala 9 da ESSL) cumprirem o RRAE, isso não implica que esta tenha, do ponto de vista prático, condições para lecionar aulas ao mesmo nível da ESG. Enquanto que as paredes divisórias da ESSL são paredes simples, apenas rebocadas, as paredes análogas na ESG foram tratadas de ambos os

lados com placas de gesso cartonado e ainda com aplicação lã de rocha, e isso é demonstrado na diferença de 7 dB no índice de isolamento sonoro ( $D_{nt,w}$ ).

Quanto ao índice de isolamento sonoro a ruídos de percussão, a ESG, nas zonas onde não existe isolamento, o desempenho é consideravelmente melhor que o existente na ESSL, sendo que após a aplicação de melhorias (foi conseguida uma melhoria de 7 dB), seria de esperar uma diferença ainda maior. Em comparação com o elemento análogo da ESSL, verifica-se então que esse valor é 14 dB superior, o que representa uma diferença astronómica em qualidade acústica entre as lajes das duas escolas.

#### 7.1.4. RASTI

Tendo em conta o tempo de reverberação das salas de ambas as escolas, era de esperar que o RASTI da ESG fosse superior ao das salas da ESSL. E é o que se verifica. Comparando os valores médios obtidos com a tabela de conversão da Norma IEC 268-16, nota-se que em média as salas da ESG têm um grau de inteligibilidade *Muito Bom/Excelente*, em contraste com o *Suficiente* das salas da ESSL. Essa diferença de qualidade da inteligibilidade provém de uma diferença de aproximadamente 0,16 no RASTI entre as duas escolas.

## 7.2. BREVES SUGESTÕES DE MELHORIA PARA A ESCOLA SECUNDÁRIA SERAFIM LEITE

### 7.2.1. ESPAÇOS/PARÂMETROS A SEREM TRATADOS

Atendendo ao cumprimento, ou incumprimento, do RRAE da breve análise feita à Escola Secundária Serafim Leite, nota-se que será necessário intervir de modo a baixar o valor do tempo de reverberação das salas, da cantina e do ginásio, assim como corrigir o isolamento sonoro das paredes que separam as salas do corredor de acesso. De referir que, apesar dos outros parâmetros se encontrarem dentro da legislação, estes também poderiam e deveriam ser intervencionados para uma melhor qualidade acústica na escola.

### 7.2.2. MELHORIA DO $D_{NT,W}$ DA PAREDE QUE SEPARA O CORREDOR DA SALA

Para corrigir a parede divisória que separa o corredor e as salas, sugere-se uma melhoria dos envidraçados existentes assim como das portas. Considerando que parte da parede que separa o corredor da sala é idêntica e da mesma espessura que a que separa as salas, deduz-se que o fraco índice de isolamento sonoro desta solução provenha da existência dos envidraçados e da porta.

A solução mais económica passaria pela aplicação de mais um vidro na parte superior da parede, formando assim uma janela dupla, visto que não se precisaria de alterar caixilharias pelos vidros estarem colados diretamente na parede. Como se pode ver no Quadro 7.2, vidros simples têm um  $R_w$  de 29 dB, enquanto que vidros duplos têm um  $R_w$  de 32 dB, o que seria uma melhoria significativa dessa parte da parede divisória. Contudo, recomenda-se o uso de vidros de espessura diferente, visto que vidros duplos com a mesma espessura nem sempre são melhores, por apresentarem a mesma  $f_{critica}$ . Além da aplicação de mais um vidro, é recomendada a instalação de batente duplo na porta assim como vedantes em todo o perímetro para impedir passagem de ruído.

Existem outras formas de intervir, mas mais dispendiosas. A *Vitrochaves / Indústria de Vidro S.A.* tem uma série de produtos para diversas funções, entre eles os produtos *ISOLAR AKUSTEX*, vidros acústicos, que apresentam  $R_w$  que podem variar entre os 36 e os 54 dB, bem acima, portanto, dos 29 a 31 dB de vidros simples existentes na parede que separa o corredor das salas. No que toca a portas, a empresa

*Carpin – Casais Wood & Metal* tem um catálogo com diversas opções de portas acústicas com atenuações que podem ir dos 29 aos 47 dB. A opção mais simples apresenta uma atenuação de 29 dB. Além disto, a porta inclui uma borracha vedante e um vedante na sua parte inferior, automática, que é ativada no momento que a porta é fechada, impedindo assim a passagem de ruído. [4,93,94,95]

Quadro 7.2 – Quadro de comparação de  $R_w$  de vidros simples, vidros duplos comuns e vidros acústicos da empresa *ISOLAR AKUSTEX®*. [95,4]

Tipo de Vidro	$R_w$ (dB)
Vidro simples 4 mm	29
Vidro simples 5 mm	30
Vidro simples 6 mm	31
Vidro duplo 4 mm - (6 a 16 mm caixa ar) – 4 mm	29
Vidro duplo 6 mm - (6 a 16 mm caixa ar) – 4 mm	32
Advance 34 // 25.36	36
Advance 34 // AF 60.54	54

### 7.2.3. MELHORIA DO TEMPO DE REVERBERAÇÃO

#### 7.2.3.1. Propostas de Intervenção

Existem diversas maneiras para baixar os valores do tempo de reverberação dos espaços da ESSL. Uma das soluções poderá passar por aplicar um teto falso absorvente. Outra maneira passa pela aplicação direta de materiais absorventes nos tetos, como por exemplo produtos celulósicos projetados (passível de ser aplicado sobre todo o tipo de materiais), com a aplicação de sistemas de gesso acústicos com absorção sonora, ou ainda a instalação de absorsores suspensos (ou *baffles*), que são no fundo placas de material poroso e fibroso, aplicados suspensos na vertical. Neste tipo de solução a absorção sonora é aumentada (em comparação com os materiais projetados e/ou que revestem a totalidade da área de teto), não só pela área disponível como pelo facto de atuar como absorsores em todas as faces. A Figura 7.1 apresenta um exemplo de *baffles* em ginásio.



Figura 7.1 – Exemplo de aplicação de *baffles* em ginásio. [96]

No âmbito desta dissertação, optou-se por analisar diversos materiais da empresa *STIER*, como é o caso dos *Sonaspray*, *SonaKrete* e o *Sonacoustic* ou o *BASWAphon*. Analisou-se ainda o comportamento de *baffles* (desta feita apenas no ginásio) *Silentium BT 50 Standard* da empresa *Silêncio*. Os produtos da *Sonaspray* são materiais celulósicos projetados diretamente no teto. A diferença entre os diversos produtos *Sonaspray* é a granulometria do material, o que lhe dá um aspeto diferente. Enquanto que o *standard* tem um acabamento mais rugoso, tipo “pasta de papel”, o *special* é uma solução intermédia e o *fc* é o que tem uma maior fineza e, portanto, um acabamento mais suave. Os produtos *Sonacoustic* são placas de lã de rocha que podem ser fixadas mecanicamente ou coladas, seguidas de um acabamento projetado e trabalhado para obter o acabamento desejado. O último produto da empresa *STIER*, é o *SonaKrete* que, como o *Sonaspray*, é um produto celuloso projetado, com a diferença de vir em forma de pasta de flocos de celulose com cola (no *Sonaspray* a cola é injetada no momento de aplicação). O *BASWAphon* é constituído por painéis de lã mineral colados sobre as superfícies, seguido de uma massa mineral até se obter um acabamento/superfície lisa. Finalmente, os *baffles Silentium BT 50 Standard* são painéis de espuma leve feita de resina de melamina e têm uma espessura de 50 mm. São comercializados com um formato típico de 1230 mm por 615 mm.

Os valores dos coeficientes de absorção sonora por banda de frequência destes materiais encontram-se no Quadro 7.3, assim como o coeficiente de absorção sonora de um teto de betão rebocado, que é a solução existente em todos os espaços da ESSL. Como se vai poder constatar a seguir, todos estes materiais acústicos têm uma especial aptidão para absorver nas altas e médias frequências, ou seja, com isto atuam diretamente nas frequências da palavra e desta forma melhoram a inteligibilidade da palavra nos espaços.



Figura 7.2 – Detalhe das camadas que constituem o *BASWAphon*. (1 – Camada de suporte, constituída por lã mineral; 2 – Camada de base, é a camada para os acabamentos *Fine* e *Base*; 3 – Segunda camada, ou segunda demão, alisada à mão para um acabamento suave). [97]

Quadro 7.3 – Coeficientes de absorção sonora dos materiais e do teto dos espaços da ESSL.

Produto	Espessura (mm)	Banda de Frequência (Hz)					
		125	250	500	1k	2k	4k
Teto de betão rebocado [4]	-	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04	0,05
<i>Sonaspray®</i> <i>K13 Standard</i> [98]	16	0,14	0,43	0,93	0,95	1,00	1,00
	25	0,20	0,55	0,95	1,00	1,00	0,95
	38	0,20	0,66	1,00	1,00	1,00	1,00
<i>Sonaspray®</i> <i>K13 Special</i> [98]	16	0,1	0,35	0,83	0,88	0,99	1,00
	19	0,09	0,35	0,87	0,87	1,00	1,00
	25	0,14	0,54	0,93	1,00	1,00	1,00
<i>Sonaspray®</i> <i>K13 fc</i> [98]	12	0,15	0,16	0,46	0,87	1,00	1,00
	19	0,18	0,27	0,67	1,00	1,00	1,00
	25	0,22	0,38	0,88	1,00	1,00	1,00
<i>SonaKrete</i> [99]	9.5	0,06	0,11	0,46	0,77	0,84	0,89
	12.5	0,01	0,16	0,49	0,89	1,00	0,97
	19	0,25	0,48	0,81	0,85	0,85	0,94
<i>Sonacoustic®</i> [100]	25	0,15	0,45	0,80	0,95	0,95	0,85
	35	0,25	0,65	0,90	0,95	0,90	0,90
	45	0,40	0,80	0,95	0,90	0,90	0,90
<i>BASWAphon</i> <i>Fine</i> [101]	30	0,02	0,20	0,70	1,00	1,00	0,93
	40	0,08	0,30	0,90	1,00	0,98	0,98
	70	0,20	0,65	0,90	1,00	0,96	0,90
<i>BASWAphon</i> <i>Base</i> [101]	30	0,02	0,18	0,63	1,00	1,00	0,92
	40	0,09	0,40	0,95	1,00	0,90	0,89
	70	0,24	0,62	1,00	1,00	0,98	0,80
<i>baffles Silen-tium BT 50 Standard</i> (1230x615 mm <sup>2</sup> ) [102]	-	0,20	0,62	0,80	1,00	1,00	1,00

### 7.2.3.2. Previsão dos Tempos de Reverberação

No subcapítulo anterior foram apresentados vários materiais passíveis de serem aplicados nos espaços da ESSL. Segue-se, então, a análise das melhorias impostas por estes, assim como a comparação das diversas soluções a nível de desempenho e custo.

Para isto é necessário fazer uma previsão dos valores do tempo de reverberação e calcular a área necessária a aplicar os materiais absorventes. Isto poderá ser estimado através de um método simplificado, usando a expressão 2.16., que corresponde à *fórmula de Sabine*. Com esta expressão, e sabendo o tempo de reverberação atual dos espaços em estudo, pode-se obter a absorção sonora existente ( $A_i$ ) nos mesmos, para as frequências de banda de oitava dos 125 aos 4k Hz, onde já fica contabilizada a absorção sonora do ar. Após isso e sabendo o coeficiente de absorção sonora dos materiais a aplicar, pode-se obter a absorção sonora alterada ( $A_1$ ). Esta será igual à absorção sonora existente, à qual se soma a diferença dos coeficientes de absorção do novo material, com o coeficiente de absorção sonora do teto atual, multiplicado pela área de teto necessária ou área de superfície absorvente ( $S_a$ ). Aplica-se novamente a expressão 2.16. para obter a  $S_a$  usando o TR desejado, que é o valor máximo imposto pelo RRAE para cada uma das situações. De notar que o método de cálculo para os *baffles* é idêntico, mas neste caso acrescenta-se o coeficiente de absorção sonora deste multiplicado pela área de *baffle*, visto que é um acréscimo de área absorvente ao espaço.

Embora se possa calcular a área mínima de teto necessária para aplicar os materiais acima mencionados e assim cumprir o RRAE, é desnecessário fazê-lo, tendo em conta que estes materiais são colocados na totalidade do teto, muitos deles por facilidade de projeção assim como por motivos estéticos. Apenas se terá de usar este método para se calcular a área mínima no caso dos *baffles*, para se saber o número necessário a instalar no ginásio. Aplicando então esse método, conclui-se que o Ginásio necessita no mínimo de 140 m<sup>2</sup> de área de *baffles*, o que corresponde a cerca de 93 *baffles Silentium BT 50 Standard* para cumprir o valor máximo imposto pelo RRAE para o Ginásio.

Os Quadros 7.4, 7.5 e 7.6, apresentam os valores dos TR previstos para cada banda de frequência de oitava por cada material a ser aplicado, assim como o TR médio previsto (500-2k Hz). É de salientar que alguns dos materiais/soluções propostas no subcapítulo anterior foram suprimidos, alguns por decisão do autor, outros por recomendação dos fabricantes, que não aconselham a aplicação de certas espessuras. Estes tempos de reverberação foram obtidos usando o método atrás referenciado mas, após a obtenção da absorção sonora alterada ( $A_1$ ), usa-se novamente a *fórmula de Sabine* para obter estes valores.

Quadro 7.4 – Valores do tempo de reverberação por banda de frequência e previsto (500-2k Hz) em função do material aplicado na totalidade da área de teto na Sala 9 (Área de teto=54 m<sup>2</sup>; V=170 m<sup>3</sup>).

Produto	Espessura (mm)	Banda de Frequência (Hz)						TR <sub>(500-2k Hz)</sub>
		125	250	500	1k	2k	4k	previsto (s)
Atualmente (s/ tratamento)		1,92	1,48	1,22	1,08	1,10	1,01	1,13
<i>K13 Standard</i>	16	1,35	0,68	0,38	0,36	0,36	0,35	0,37
	25	1,17	0,59	0,38	0,35	0,36	0,36	0,36
<i>K13 Special</i>	19	1,56	0,76	0,40	0,39	0,36	0,35	0,38
	25	1,35	0,59	0,38	0,35	0,36	0,35	0,36
<i>K13 fc</i>	19	1,22	0,87	0,48	0,35	0,36	0,35	0,39
	25	1,11	0,73	0,40	0,35	0,36	0,36	0,37
<i>SonaKrete</i>	12,5	2,08	1,07	0,58	0,38	0,36	0,36	0,44
	19	1,04	0,64	0,42	0,39	0,40	0,36	0,40
<i>Sonacoustic®</i>	25	1,32	0,66	0,43	0,36	0,37	0,39	0,39
<i>BASWAphon Fine</i>	30	2,00	0,99	0,47	0,35	0,36	0,37	0,39
	70	1,17	0,52	0,39	0,35	0,37	0,37	0,37
<i>BASWAphon Base</i>	30	2,00	1,03	0,50	0,35	0,36	0,37	0,40
	70	1,07	0,54	0,36	0,35	0,36	0,40	0,36

Como se verifica no Quadro 7.4, a aplicação destes materiais acústicos na totalidade do teto da Sala 9 permite uma redução do tempo de reverberação médio de 1,13 s para valores de cerca de 0,4 s, o que significa uma redução máxima de cerca de 0,8 s, conseguido apenas com a aplicação de *Sonaspray K13 Standard* de 25 mm, *Sonaspray K13 Special* de 25 mm ou com o *BASWAphon Base* de 70 mm. Esta redução máxima de 0,8 s, não apenas faz com que cumpra o RRAE (0,83 s), como os valores ideais para salas de aula (0,6 s) são ultrapassados em cerca de 0,2 s.

Quadro 7.5 – Valores do tempo de reverberação por banda de frequência e previsto (500-2k Hz) em função do material aplicado na totalidade da área de teto na Cantina (Área de teto=172 m<sup>2</sup>; V=532 m<sup>3</sup>).

Produto	Espessura (mm)	Banda de Frequência (Hz)						TR <sub>(500-2k Hz)</sub>
		125	250	500	1k	2k	4k	previsto (s)
Atualmente (s/ tratamento)		2,67	2,31	2,68	2,68	2,43	1,93	2,60
<i>K13 Standard</i>	16	1,68	0,81	0,46	0,45	0,43	0,41	0,44
	25	1,39	0,67	0,45	0,43	0,43	0,43	0,43
<i>K13 Special</i>	19	2,02	0,93	0,48	0,48	0,43	0,41	0,46
	25	1,68	0,68	0,46	0,43	0,43	0,41	0,44
<i>K13 fc</i>	19	1,48	1,09	0,60	0,43	0,43	0,41	0,48
	25	1,32	0,88	0,48	0,43	0,43	0,41	0,44
<i>SonaKrete</i>	12,5	2,99	1,44	0,77	0,47	0,43	0,42	0,56
	19	1,22	0,75	0,51	0,49	0,49	0,43	0,50
<i>Sonacoustic</i> <sup>®</sup>	25	1,62	0,78	0,52	0,45	0,44	0,47	0,47
<i>BASWAphon Fine</i>	30	2,82	1,29	0,58	0,43	0,43	0,44	0,48
	70	1,39	0,59	0,47	0,43	0,44	0,45	0,45
<i>BASWAphon Base</i>	30	2,82	1,36	0,63	0,43	0,43	0,44	0,49
	70	1,25	0,62	0,43	0,43	0,43	0,49	0,43

Após uma rápida análise do Quadro 7.5, nota-se que a aplicação dos materiais acústicos faz com que haja uma redução média do tempo de reverberação médio da Cantina em 2 s. Na melhor das hipóteses, com a aplicação de *BASWAphon Base* de 70 mm ou com a aplicação de *Sonacoustic*<sup>®</sup> *K13 Standard* de 25 mm, é possível reduzir o tempo de reverberação médio da Cantina em valores na ordem dos 2,2 s.

Da mesma forma que na Sala 9, os valores de tempo de reverberação previsivelmente obtidos com a aplicação destes materiais acústicos fazem com que a Cantina cumpra o RRAE (o valor máximo imposto pelo regulamento é de 1,2 s), como também faz com que ultrapasse os valores ideais para este tipo de espaços que tem o mesmo valor de 1,2 s.

Quadro 7.6 – Valores do tempo de reverberação por banda de frequência e previsto (500-2k Hz) em função do material aplicado na totalidade da área de teto no Ginásio (Área de teto = 623 m<sup>2</sup>; V = 4630 m<sup>3</sup>).

Produto	Espessura (mm)	Banda de Frequência (Hz)						TR <sub>(500-2k Hz)</sub>
		125	250	500	1k	2k	4k	previsto (s)
Atualmente (s/ tratamento)		5,69	3,49	4,14	5,02	4,12	2,55	4,43
<i>K13 Standard</i>	16	3,73	1,61	1,00	1,03	0,95	0,84	0,99
	25	3,14	1,38	0,98	0,99	0,95	0,84	0,97
<i>K13 Special</i>	19	4,42	1,80	1,05	1,10	0,95	0,84	1,04
	25	3,73	1,40	1,00	0,99	0,95	0,84	0,98
<i>K13 fc</i>	19	3,31	2,05	1,28	0,99	0,95	0,84	1,07
	25	2,98	1,72	1,05	0,99	0,95	0,84	0,99
<i>SonaKrete</i>	12,5	6,29	2,53	1,59	1,08	0,95	0,86	1,21
	19	2,77	1,50	1,11	1,13	1,08	0,88	1,11
<i>Sonacoustic</i> <sup>®</sup>	25	3,61	1,56	1,12	1,03	0,99	0,94	1,05
<i>BASWAphon Fine</i>	30	5,98	2,33	1,24	0,99	0,95	0,88	1,06
	70	3,14	1,24	1,03	0,99	0,98	0,90	1,00
<i>BASWAphon Base</i>	30	5,98	2,42	1,34	0,99	0,95	0,89	1,09
	70	2,84	1,28	0,95	0,99	0,97	0,98	0,97
<i>baffles Silen- tium BT 50 Standard</i> (1230x615 mm <sup>2</sup> )	-	4,68	2,48	2,55	2,58	2,32	1,72	2,48

Como se verifica no Quadro 7.6, os valores do tempo de reverberação previstos após a aplicação de materiais acústicos no teto do Ginásio encontram-se na ordem de uma unidade de segundo, o que significa uma redução do tempo de reverberação médio em mais de 3 s. As melhores soluções do ponto de vista da redução do tempo de reverberação são com o *BASWAphon Base* de 70 mm, ou com a aplicação de *Sonacoustic K13 Standard* de 25 mm. Pode-se constatar também que a aplicação de *baffles* não é tão eficaz como os outros materiais. Porém, este resultado de 2,5 s foi obtido após a possível aplicação de 93 *baffles Silentium BT 50 Standard*, que seria a quantidade necessária para simplesmente cumprir o RRAE.

Da mesma forma que na Sala 9 e na Cantina, também no Ginásio os valores previstos para o tempo de reverberação ultrapassam os valores ideais (inferiores a 3,0 s) para aquele espaço.

## 7.2.3.3. Análise Económica

Se o critério de seleção de aplicação de material acústico para correção do espaço for simplesmente estético, o *BASWAphon* e o *Sonacoustic* são claramente os mais indicados devido ao seu acabamento imaculadamente liso e discreto, contrariamente ao *Sonaspray K13 Standard*, que tem um acabamento bastante rugoso. No entanto, se se tiver em consideração o custo, ter-se-à de fazer uma análise económica e comparar o custo de cada material. Os Quadros 7.7, 7.8 e 7.9 apresentam uma estimativa orçamental total, assim como o custo necessário para reduzir em um segundo o tempo de reverberação, para cada material. As Figuras 7.2, 7.3 e 7.4 apresentam a variação dos tempos de reverberação dos materiais possíveis de serem aplicados para corrigir o tempo de reverberação.

Quadro 7.7 – Estimativa orçamental por material acústico para a Sala 9 da ESSL (Área de teto = 54 m<sup>2</sup>).

Produto	Espessura (mm)	TR <sub>(500-2k Hz)</sub> previsto (s)	Preço aproximado (€/m <sup>2</sup> )	ΔTR* (s)	Preço por ΔTR* (€/s)	Preço Total aproximado (€)
Atualmente (s/ tratamento)	-	1,13	-	-	-	-
<i>K13 Standard</i>	16	0,37	26	- 0,76	1841	1404
	25	0,36	29	- 0,77	2037	1566
<i>K13 Special</i>	19	0,38	28	- 0,75	2019	1512
	25	0,36	31	- 0,77	2183	1674
<i>K13 fc</i>	19	0,39	38	- 0,74	2791	2052
	25	0,37	41	- 0,76	2906	2214
<i>SonaKrete</i>	12,5	0,44	72	- 0,69	5613	3888
	19	0,40	77	- 0,73	5725	4158
<i>Sonacoustic</i> <sup>®</sup>	25	0,39	130	- 0,74	9433	7020
<i>BASWAphon Fine</i>	30	0,39	115	- 0,74	8396	6210
	70	0,37	150	- 0,76	10653	8100
<i>BASWAphon Base</i>	30	0,40	115	- 0,73	8519	6210
	70	0,36	150	- 0,77	10498	8100

\* ΔTR é a diferença entre o TR (500-2k Hz) previsto de cada material e o Tempo de Reverberação atualmente (sem tratamento)

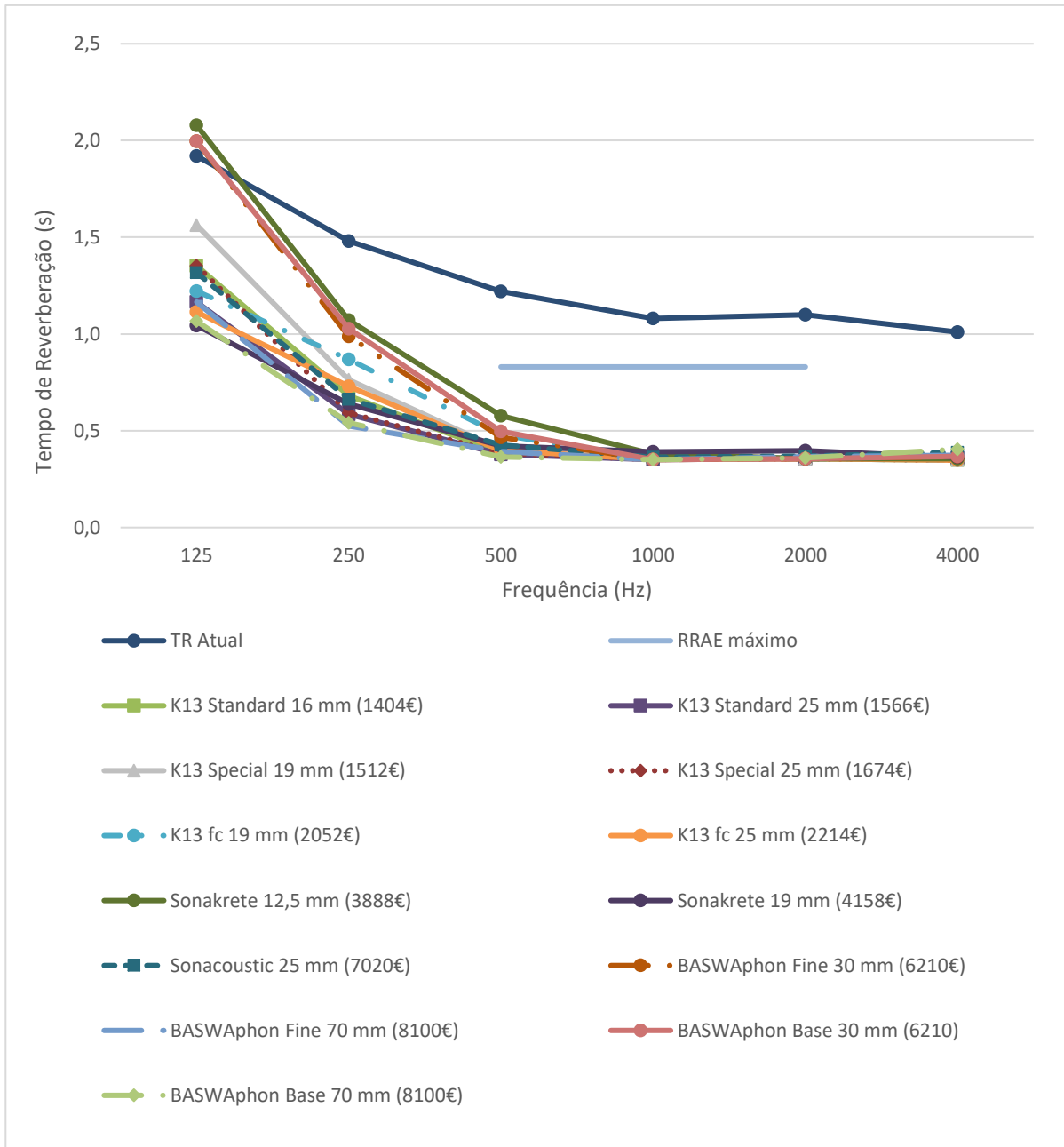


Figura 7.3 – Variação dos valores do tempo de reverberação em função de cada hipótese de material acústico a aplicar na Sala 9 da ESSL e respetiva imposição legal máxima do RRAE.

Quadro 7.8 – Estimativa orçamental por material acústico para a Cantina (Área de teto = 172 m<sup>2</sup>).

Produto	Espessura (mm)	TR (500-2k Hz) previsto (s)	Preço aproximado (€/m <sup>2</sup> )	ΔTR* (s)	Preço por ΔTR*	Preço Total aproximado (€)
Atualmente (s/ tratamento)	-	2,60	-	-	-	-
<i>K13 Standard</i>	16	0,44	26	- 2,16	2073	4472
	25	0,43	29	- 2,17	2303	4988
<i>K13 Special</i>	19	0,46	28	- 2,14	2254	4816
	25	0,44	31	- 2,16	2465	5332
<i>K13 fc</i>	19	0,48	38	- 2,12	3090	6536
	25	0,44	41	- 2,16	3271	7052
<i>SonaKrete</i>	12,5	0,56	72	- 2,04	6057	12384
	19	0,50	77	- 2,10	6300	13244
<i>Sonacoustic®</i>	25	0,47	130	- 2,13	10499	22360
<i>BASWAphon Fine</i>	30	0,48	115	- 2,12	9320	19780
	70	0,45	150	- 2,15	11978	25800
<i>BASWAphon Base</i>	30	0,49	115	- 2,11	9396	19780
	70	0,43	150	- 2,17	11889	25800

\* ΔTR é a diferença entre o TR (500-2k Hz) previsto de cada material e o Tempo de Reverberação atualmente (sem tratamento)

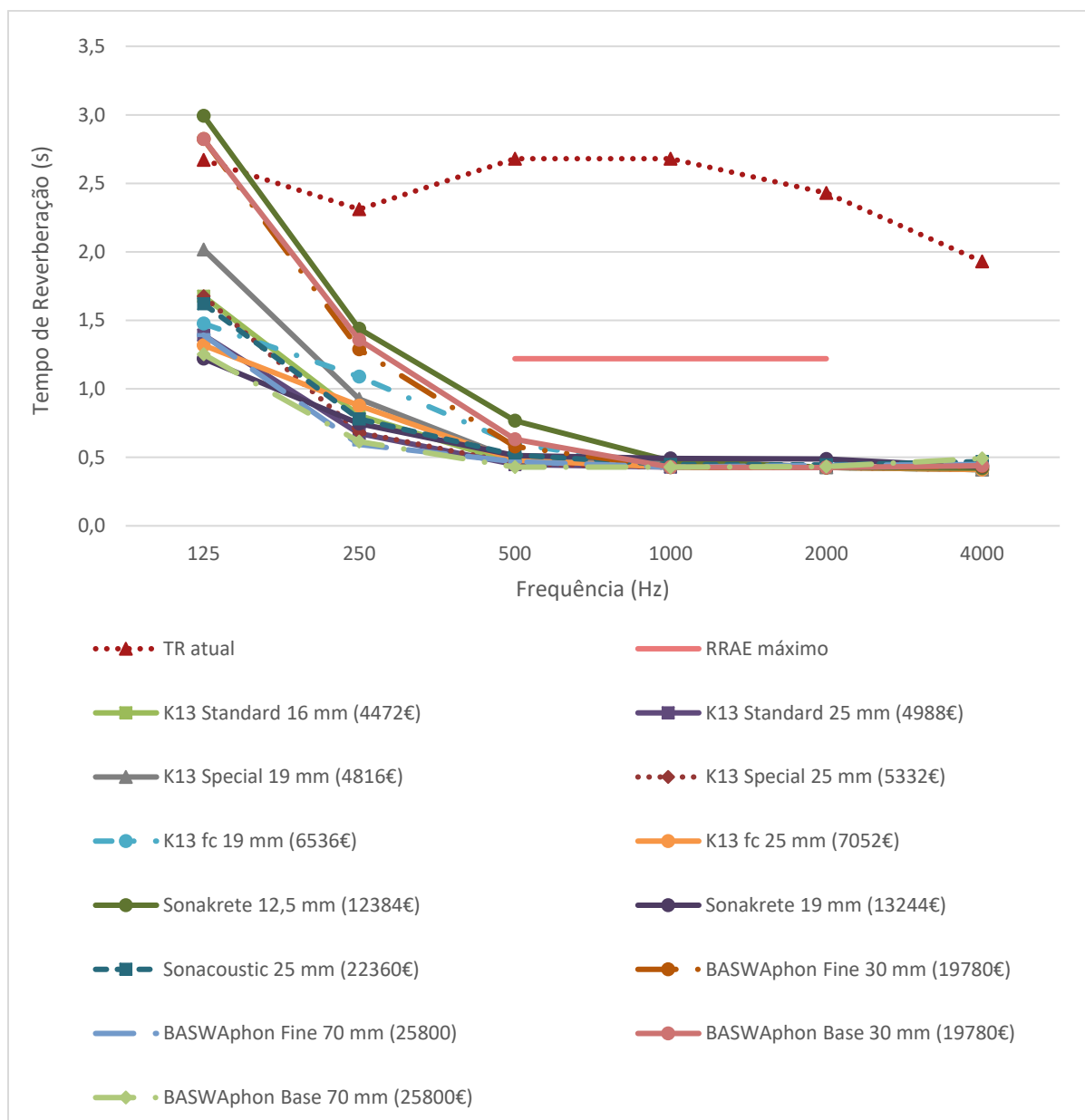


Figura 7.4 – Variação dos valores do tempo de reverberação em função de cada hipótese de material acústico a aplicar na Cantina da ESSL e respetiva imposição legal máxima do RRAE.

Quadro 7.9 – Estimativa orçamental por material acústico para o Ginásio (Área de teto = 623 m<sup>2</sup>).

Produto	Espessura (mm)	TR (500-2k Hz) previsto (s)	Preço aproximado (€/m <sup>2</sup> )	ΔTR* (s)	Preço por ΔTR*	Preço Total aproximado (€)
Atualmente (s/ tratamento)	-	4,43	-	-	-	-
<i>K13 Standard</i>	16	0,99	26	- 3,44	4714	16198
	25	0,97	29	- 3,46	5228	18067
<i>K13 Special</i>	19	1,04	28	- 3,39	5141	17444
	25	0,98	31	- 3,45	5598	19313
<i>K13 fc</i>	19	1,07	38	- 3,36	7053	23674
	25	0,99	41	- 3,44	7435	25543
<i>SonaKrete</i>	12,5	1,21	72	- 3,22	13927	44856
	19	1,11	77	- 3,32	14437	47971
<i>Sonacoustic®</i>	25	1,05	130	- 3,38	23949	80990
<i>BASWAphon Fine</i>	30	1,06	115	- 3,37	21259	71645
	70	1,00	150	- 3,43	27236	93450
<i>BASWAphon Base</i>	30	1,09	115	- 3,34	21467	71645
	70	0,97	150	- 3,46	26980	93450
<i>baffles Silentium BT 50 Standard</i>	93 unidades	2,48	60 €/unidade**	- 1,95	2861	5580**

\* ΔTR é a diferença entre o TR (500-2k Hz) previsto de cada material e o Tempo de Reverberação atualmente (sem tratamento)

\*\* Valor sem IVA e sem custo de mão de obra

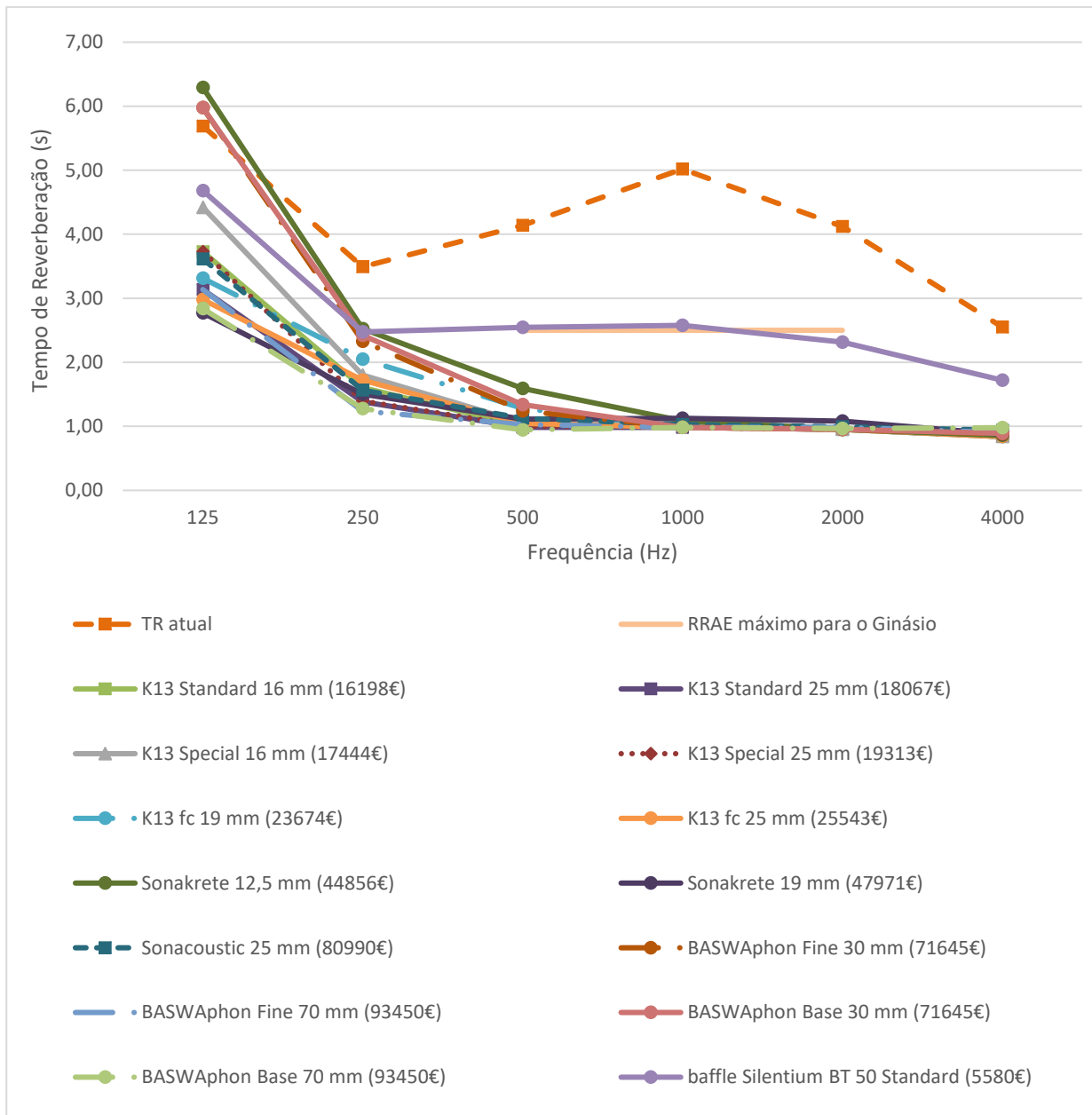


Figura 7.5 – Variação dos valores do tempo de reverberação em função de cada hipótese de material acústico a aplicar na Ginásio da ESSL e respetiva imposição legal máxima do RRAE.

O Quadro 7.10, que se segue, apresenta para a Sala 9, para a Cantina e para o Ginásio, a melhor solução (com melhor desempenho) e a solução mais económica a aplicar em cada espaço. Salienta-se o facto de não se entrar em consideração nesta análise final com os *baffles* para o Ginásio, pelo facto de não se conhecer o preço de mão-de-obra e, portanto, não se poder fazer uma comparação objetiva correta desse material com os restantes.

Quadro 7.10 – Quadro resumo das soluções com melhor desempenho e mais económicas a aplicar, assim como a escolha ideal do material a aplicar nos espaços da ESSL.

Local	Solução c/ melhor de- sempenho	Custo (€)	Solução mais económica	Custo (€)	Escolha ideal
Sala 9	<i>K13 Standard</i> 25 mm	1566	<i>K13 Standard</i> 16 mm	1404	<i>K13 Standard</i> 16 mm
	<i>K13 Special</i> 25 mm	1674			
	<i>BASWAphon</i> Base 70 mm	8100			
Cantina	<i>K13 Standard</i> 25 mm	4988	<i>K13 Standard</i> 16 mm	4472	<i>K13 Standard</i> 16 mm
	<i>BASWAphon</i> Base 70 mm	25800			
Ginásio	<i>K13 Standard</i> 25 mm	18067	<i>K13 Standard</i> 16 mm	16198	<i>K13 Standard</i> 16 mm
	<i>BASWAphon</i> Base 70 mm	93450			

As escolhas ideais, apesar de não serem as soluções com melhor desempenho são, coincidentemente, as opções mais económicas. Apesar disto, em todos os casos, o *Sonaspray K13 Standard* de 16 mm tem um desempenho insignificativamente inferior aos restantes. A título de exemplo, no caso da Sala 9, o *Sonaspray K13 Standard* de 16 mm que tem um custo de 1404 € e, portanto, mais de 150 € mais barato que *Sonaspray K13 Standard* 25 mm ou 200 € mais barato que o *Sonaspray K13 Special* 25 mm, tendo apenas um desempenho inferior de 0,01 s, ou seja, insignificante.



## 8

## CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

### 8.1. CONCLUSÕES

Esta dissertação teve como principal objetivo caracterizar alguns dos espaços letivos e consequente qualidade acústica da Escola Secundária Serafim Leite, em São João da Madeira. Para tal efeito, foram efetuadas medições *in situ* de alguns parâmetros e confrontou-se esses valores com a legislação em vigor em Portugal. Infelizmente, devido a restrições impostas pelo COVID-19 e disponibilidade de todas as partes (autor, direção da Escola Secundária Serafim Leite e do engenheiro responsável pelas medições), não foi possível medir todos os parâmetros desejados, assim como medições noutras salas e espaços da escola para um melhor levantamento e obter uma caracterização acústica mais completa da Escola Secundária Serafim Leite.

Outro objetivo, para além da caracterização, passaria por alertar a necessidade da escola precisar de ser intervencionada e modernizada de modo a corresponder as necessidades atuais de ensino e legislações em vigor, no que toca à acústica.

Para caraterizar os espaços letivos, foram medidos parâmetros como o tempo de reverberação, TR, o índice de isolamento sonoro a ruídos de condução aéreos padronizado ( $D_{nT,w}$ ), o índice de isolamento sonoro a ruídos de percussão padronizado ( $L_{nT,w}$ ) e o RASTI para analisar a inteligibilidade da palavra na sala de aula.

Relativamente aos tempos de reverberação nenhum dos espaços onde foi analisado este parâmetro, cumpre o Regulamento dos Requisitos Acústicos de Edifícios, e consequentemente os valores encontrados de 1,1 s para a sala de aula, 2,6 s para a cantina e de 4,4 s para o ginásio, encontram-se longe dos ideais para esses espaços.

No que toca ao isolamento sonoro, é se salientar o cumprimento da legislação em vigor, tanto para o índice de isolamento sonoro a ruídos de condução aérea entre salas ( $D_{nT,w} = 44$  dB) como para o índice de isolamento sonoro a ruídos percussão entre salas ( $L_{nT,w} = 64$  dB). A situação mais preocupante, e que, obviamente não cumpre o RRAE, é o isolamento sonoro da parede entre o corredor e a sala 9 ( $D_{nT,w} = 23$  dB).

O quadro 8.1, que se segue é um quadro resumo de todos os parâmetros analisados no âmbito desta dissertação, assim como os valores finais obtidos para cada um deles.

Quadro 8.1. – Quadro resumo dos parâmetros medidos na Escola Secundária Serafim Leite.

Parâmetro	Local/Elemento	Valor	Limite RRAE	OK / KO
Tempo de Reverberação (500-2k Hz) (s)	Sala 9	1,13	$\leq 0,83$	KO
	Cantina	2,60	$\leq 1,22$	KO
	Ginásio	4,43	$\leq 2,50$	KO
Índice de isolamento sonoro a ruídos de condução aérea, $D_{nT,w}$ (dB)	Parede divisória Sala 8 / Sala 9	44	$\geq 45$	OK (c/ Incerteza)
	Parede divisória Corredor / Sala 9	23	$\geq 30$	KO
Índice de isolamento sonoro a ruídos de percussão, $L'_{nT,w}$ (dB)	Laje Sala 16 / Sala 9	64	$\leq 65$	OK
RASTI	Sala 9	0,58	$\geq 0,60$	KO

Também houve a possibilidade de comparar os parâmetros indicados com uma escola intervencionada pela “Parque Escolar E.P.E.”, a Escola Secundária de Gondomar que apresenta tratamento acústico em todos os espaços. Em comparação com a escola alvo de estudo, a Escola Secundária Serafim Leite, nota-se que os TR de uma escola intervencionada, além de cumprirem o RRAE, são cerca de 0,6 s inferiores aos da ESSL nas salas, 1,4 s na Cantina e 3,0 s no Ginásio. Consequentemente, o RASTI da ESSL está abaixo dos 0,6 recomendados, o que não acontece na ESG, que tem valores de inteligibilidade *Bons* (0,75). No que toca a índices de isolamento sonoro, e apesar de na ESSL, surpreendentemente, alguns destes cumprirem o RRAE (como é o caso do  $L'_{nT,w}$  na laje entre salas e  $D_{nT,w}$  na parede divisória entre salas), estes valores acabam por demonstrar um pior desempenho em comparação aos da ESG (2 dB no  $L'_{nT,w}$  das lajes e 7 dB no  $D_{nT,w}$  nas paredes entre salas) e, portanto, com menor capacidade de isolar a sala de aula a ruídos exteriores.

No que diz respeito a soluções de melhoria do tempo de reverberação dos espaços em estudo da ESSL, após verificar o desempenho acústico de diversos materiais e respetiva análise económica, recomenda-se o uso de Sonaspray *K13 Standard* de 16 mm nos três espaços em estudo, de modo a cumprir o RRAE. Os valores de tempo de reverberação previstos após a aplicação deste material conseguem ainda satisfazer os valores ideais propostos por diversos autores para os diferentes espaços. Para melhorar o índice de isolamento sonoro a ruídos de condução aérea, é recomendada a aplicação de um vidro, de modo a formar uma janela dupla, assim como a aplicação de vedantes em todo o perímetro da porta e batente duplo.

## 8.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Para desenvolvimentos futuros, dever-se-á dar continuidade à caracterização acústica dos espaços da Escola Secundária Serafim Leite, de forma a se obter um estudo completo da escola que, como já foi

mencionado, não foi possível ter sido um levantamento muito aprofundado. Para obter então um levantamento mais completo, sugere-se que para desenvolvimentos futuros, se dê continuação aos parâmetros analisados nesta dissertação, repetição destes parâmetros para outros espaços da escola, como polivalentes, laboratórios, auditórios e biblioteca da escola.

Como também já foi mencionado ao longo desta dissertação, parâmetros como o índice de isolamento sonoro a ruídos de condução aérea com o exterior ( $D_{2m,n,T}$ ) não foram analisados, assim como o nível de avaliação do ruído de equipamentos ( $L_{Ar}$ ). No futuro sugere-se a medição destes parâmetros para um estudo completo da escola.

Também outros parâmetros acústicos poderão e deverão ser analisados havendo oportunidade, como a Claridade ( $C_{80}$ ) e a Definição ( $D_{50}$ ), ou ainda usando métodos mais exaustivos de análise da inteligibilidade da palavra (STI).

Todas as medições foram efetuadas sem atividade letiva na escola devido ao COVID-19, pelo que seria também interessante repetir medições, em ambiente normal do dia-a-dia escola da ESSL, com ruído do recreio com alunos, assim como ruído nas salas de aula aquando da presença de alunos nos corredores/halls de acesso, entre outros. A medição de ruído das aulas de Ed. Física com as aulas a decorrer e o mesmo na cantina aquando das horas da refeição, também seriam parâmetros interessantes a analisar futuramente.

Poderia-se também obter informação subjetiva dos utilizadores (alunos, docentes e auxiliares de educação), através de inquéritos, e comparar a percepção destes com o resultado do levantamento acústico e constatar de realmente os resultados apoiam a sensação de conforto ou falta dele nos diferentes espaços.

Aquando da realização desta dissertação, a escola encontrava-se em obras de requalificação e modernização das oficinas, onde por norma são lecionadas aulas dos cursos técnico-profissionais. Seria também de interesse efetuar um levantamento/estudo acústico após a conclusão de ditas obras e comparar com espaços análogos na escola.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] LUBMAN, D.; SUTHERLAND, L. C. (2001) - The Impact of Classroom Acoustics on Scholastic Achievement. 2001.
- [2] MILLER, Jon F.; LEDDY, Mark Gene; LEAVITT, Lewis A. (1999) - Improving the communication of people with Down syndrome. In Baltimore, MD: Paul H. Brookes Pub. p. 61-80.
- [3] COHEN, Sheldon [et al.] (1980) - Physiological, motivational, and cognitive effects of aircraft noise on children: Moving from the laboratory to the field. American Psychologist [Em linha]. 35:3. 231-243. ISSN 1935-990X(Electronic),0003-066X(Print).
- [4] CARVALHO, António Pedro Oliveira de (2007) - Acústica ambiental e de edifícios. FEUP - Porto:
- [5] EVEREST, F.A. (2001) - The Master Handbook of Acoustics, Fourth Edition. McGraw-Hill.
- [6] GIBSON, John - Introduction to Acoustics [Em linha]. [Consult. 16/10/2020]. Disponível em WWW: < <https://cecm.indiana.edu/361/acoustics.html>>.
- [7] HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl - Fundamentos de Física. 9.
- [8] ACÚSTICA, Vibrasom Tecnologia - Tabela de Pressão Sonora [Em linha]. [Consult. 16/10/2020]. Disponível em WWW: < <https://www.vibrasom.ind.br/tabela-de-pressao-sonora.html>>.
- [9] BRITANNICA, The Editors of Encyclopaedia - Frequency [Em linha]. [Consult. 16/10/2020]. Disponível em WWW: < <https://www.britannica.com/science/frequency-physics>>.
- [10] PUJOL, Rémy - HUMAN AUDITORY RANGE [Em linha]. [Consult. 16/10/2020]. Disponível em WWW: < <http://www.cochlea.org/en/hear/human-auditory-range>>.
- [11] CLASSROOM, The Physics - Frequency and Period of a Wave [Em linha]. [Consult. 16/10/2020]. Disponível em WWW: < <https://www.physicsclassroom.com/class/waves/Lesson-2/Frequency-and-Period-of-a-Wave>>.
- [12] SALLY - Choosing suitable audio equipment for oral history interviews: perspectives of an audio engineer [Em linha]. [Consult. 16/10/2020]. Disponível em WWW: < <http://listeningtothepast.com.au/2018/06/choosing-equipment/>>.
- [13] MOREIRA, Anabela - Acústica - Noções Elementares [Em linha]. [Consult. 16/10/2020]. Disponível em WWW: < [http://www.estt.ipt.pt/download/disciplina/2959\\_NocElementares\\_P2\\_FC.pdf](http://www.estt.ipt.pt/download/disciplina/2959_NocElementares_P2_FC.pdf)>.
- [14] MENEZES, Maria Inês Alves Antunes Saraiva de (2011) - Caracterização acústica interior de edifícios escolares reabilitados. : O caso da Escola Secundária Rodrigues de Freitas, Porto. FEUP - Dissertação: FEUP.
- [15] ISO (1997) - ISO 11654:1997 Acoustics — Sound absorbers for use in buildings — Rating of sound absorption.
- [16] --- (2003) - Acústica; Medição da absorção sonora em câmara reverberante (ISO 354:2003).
- [17] ASTM (2017) - ASTM C423 - 17 Standard Test Method for Sound Absorption and Sound Absorption Coefficients by the Reverberation Room Method.
- [18] SILVA, Carlos Miguel Ferreira e (2013) - O Tempo da Reverberação e a Inteligibilidade da Palavra - Caso de Estudo: Salas de Aula da FEUP. FEUP.
- [19] CORTIÇA24.PT - Aglomerado de cortiça expandida 30x500x1000mm - BESTSELLER! [Em linha]. [Consult. 17/10/2020]. Disponível em WWW: < <https://cortica24.pt/loja/32-aglomerado-de-cortica-expandida/327-aglomerado-de-cortica-expandida-30x500x1000mm/>>.
- [20] VÁZQUEZ, Arturo Torres (2019) - ¿Que es la espuma de poliuretano? [Em linha]. [Consult. 17/10/2020]. Disponível em WWW: < <https://www.reaxsol.com/2019/10/10/que-es-la-espuma-de-poliuretano-2/>>.
- [21] MERLIN, Leroy - Isolamento de lã de rocha TERMOLAN ROCTERM PN30 40MM 0.81M² [Em linha]. [Consult. 17/10/2020]. Disponível em WWW: < [https://www.leroymerlin.pt/Produtos/Construcao/Isolamento/Isolamento-termo-acustico/WPR\\_REF\\_14607656](https://www.leroymerlin.pt/Produtos/Construcao/Isolamento/Isolamento-termo-acustico/WPR_REF_14607656)>.
- [22] PESSOA, Ana Sofia Mendes (2018) - Melhoria do Desempenho Acústico de uma Sala de Aula com Materiais de Desperdício. FEUP.
- [23] TECHNATURE - REFLECTED SOUND [Em linha]. [Consult. 17/10/2020]. Disponível em WWW: < <http://www.technature.ca/acoustics-101/reflected-sound/>>.
- [24] MUNTEANU, Constantin [et al.] (2017) - Study on the Acoustic Rehabilitation of an Educational Building. [Em linha]. 181: 131-138. ISSN 1877-7058.

- [25] CARDINALE, N.; PICCININNI, F. (2003) - The Influence of Shape on The Acoustical Performance of Classrooms. Nápoles, Itália, 2003.
- [26] BRADLEY, J. S.; SATO, H. (2008) - The intelligibility of speech in elementary school classrooms. [Em linha]. 123:4. 2078-2086.
- [27] ZANNIN, P. H.; MARCON, C. R. (2007) - Objective and subjective evaluation of the acoustic comfort in classrooms. Appl Ergon [Em linha]. 38:5. 675-80. ISSN 0003-6870 (Print).
- [28] PRATA-SHIMOMURA, Alessandra [et al.] - Desempenho Acústico, Arquitetura e Urbanismo, Aula 7. FAUUSP.
- [29] ISO, NP (2009) - 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).
- [30] --- (2009) - NP EN ISO 717-2:2009. Acústica. Determinação do isolamento sonoro em edifícios e de elementos de construção, Parte 2: Isolamento sonoro a sons de percussão (ISO 717-2:1996 + A1:2006).
- [31] PATRÍCIO, Jorge Viçoso (2018) - A Acústica na Reabilitação de Edifícios. PUBLINDUSTRIA.
- [32] BRADLEY, John - Classroom acoustics to support student learning. [Em linha].
- [33] KUTTRUFF, H. (2000) - Room Acoustics, Fourth Edition. Taylor & Francis. ISBN 9780419245803.
- [34] ASTM (2006) - ASTM E 1110 “Standard Classification for Determination of Articulation Class.” ASTM Volume 04.06 Thermal Insulation; Building and Environmental Acoustics.
- [35] SEDDEQ, H. S. (2012) - Acoustics of suspended ceilings and speech privacy. [Em linha]. 40: 23-27.
- [36] CARVALHO, A. %J Applied Acoustics (1999) - Relations between rapid speech transmission index (RASTI) and other acoustical and architectural measures in churches. [Em linha]. 58: 33-49.
- [37] IEC (1988) - IEC 60268-16:1988 Sound system equipment. Part 16: The objective rating of speech intelligibility in auditoria by the RASTI method. [Em linha].
- [38] VITRUVIUS, Pollio; MORGAN, M. H. (1960) - Vitruvius : the ten books on architecture. New York: Dover Publications. ISBN 0486206459 9780486206455.
- [39] BRITANNICA, The Editors of Encyclopaedia - Wallace Clement Sabine [Em linha]. [Consult. Disponível em WWW: < <https://www.britannica.com/biography/Wallace-Clement-Ware-Sabine>>.
- [40] KATZ, Brian; WETHERILL, Ewart (2005) - Fogg Art Museum Lecture Room, A calibrated recreation of the birthplace of Room Acoustics. The Journal of the Acoustical Society of America [Em linha].
- [41] SABINE, Wallace Clement; EGAN, M. David (1994) - Collected Papers on Acoustics. [Em linha]. 95:6. 3679-3680.
- [42] MARCZINKSE, Knut (2001) - CLASSROOM ACOUSTICS – AN ACADEMIC PLAYGROUND OR A MAJOR SUBJECT FOR QUALIFIED EDUCATION? . In 4th European Conference on Noise Control EURONOISE 2001. Patras: 2001.
- [43] COHEN, Sheldon; GLASS, David C.; SINGER, Jerome E. (1973) - Apartment noise, auditory discrimination, and reading ability in children. Journal of Experimental Social Psychology [Em linha]. 9:5. 407-422. ISSN 0022-1031.
- [44] BRONZAFT, Arline L.; MCCARTHY, Dennis P. (1975) - The effect of elevated train noise on reading ability. Environment and Behavior [Em linha]. 7:4. 517-527. ISSN 1552-390X(Electronic),0013-9165(Print).
- [45] BRONZAFT, Arline L. (1981) - The effect of a noise abatement program on reading ability. Journal of Environmental Psychology [Em linha]. 1:3. 215-222. ISSN 0272-4944.
- [46] EVANS, Gary W.; MAXWELL, Lorraine (1997) - Chronic Noise Exposure and Reading Deficits:The Mediating Effects of Language Acquisition. [Em linha]. 29:5. 638-656.
- [47] LUKAS, J. S. (2001) - Noise, classroom behavior and third and sixth grade reading achievement. Rome, Italy, 2001. [Consult. 2-7 September 2001].
- [48] BISTAFA, Sylvio R.; BRADLEY, John S. (2000) - Reverberation time and maximum background-noise level for classrooms from a comparative study of speech intelligibility metrics. [Em linha]. 107:2. 861-875.
- [49] HAGEN, M. [et al.] (2004) - Developing an Acoustic School Design: Steps to Improve Hearing and Listening at Schools. [Em linha]. 11: 293 - 307.
- [50] DIN (2004) - DIN 18041 Acoustic quality in small and middle-size rooms.

- [51] KLATTE, M.; LACHMANN, T.; MEIS, M. (2010) - Effects of noise and reverberation on speech perception and listening comprehension of children and adults in a classroom-like setting. Noise Health [Em linha]. 12:49. 270-82. ISSN 1463-1741 (Print).
- [52] ROY, N. [et al.] (2004) - Prevalence of voice disorders in teachers and the general population. J Speech Lang Hear Res [Em linha]. 47:2. 281-93. ISSN 1092-4388 (Print).
- [53] MACHADO, Heloisa M; SILVA, Elcione M; SOBRINHO, Mario Vasconcellos (2008) - A interferência do ruído produzido em espaços abertos nos recursos vocais de professores. Coimbra, Portugal, 2008. [Consult. 20 - 22 de Outubro].
- [54] BARREIRA, Carla Cristina da Silva (2012) - Conforto e qualidade ambiental na utilização de parques desportivos escolares em Portugal. FADEUP.
- [55] PINHO, P. G. [et al.] (2018) - Aspects concerning the acoustical performance of school cafeterias. Applied Acoustics [Em linha]. 136: 36-40. ISSN 0003-682X.
- [56] MOULDER, R. (1993) - Quiet Areas in Restaurants
- [57] TANG, S. K.; CHAN, Daniel W. T.; CHAN, K. C. (1997) - Prediction of sound-pressure level in an occupied enclosure. [Em linha]. 101:5. 2990-2993.
- [58] HAMAYON, Loïc (2006) - Réussir l'acoustique d'un bâtiment [Texte imprimé] / Loïc Hamayon. 2e édition. Paris: Éd. le Moniteur. ISBN 2-281-11264-0.
- [59] BATTAGLIA, Paul L. (2014) - Achieving acoustical comfort in restaurants. [Em linha]. 22:1. 015001.
- [60] ÁLVAREZ, L [et al.] (2011) - Acústica de una pista polideportiva multiusos con cubierta en membrana textil tensionada. 2011.
- [61] RYAN, Stu (2009) - The Effects of a Sound-Field Amplification System on Managerial Time in Middle School Physical Education Settings. [Em linha]. 40:2. 131-137.
- [62] WRÓBLEWSKA, Dominika (2010) - Acoustical Standards Used in Design of School Spaces. Acta Physica Polonica A [Em linha]. 118: 186-189.
- [63] ISBERT, Antoni Carrión (1998) - Diseño acústico de espacios arquitectónicos. Univ. Politèc. de Catalunya. ISBN 8483012529.
- [64] BB (2000) - BB93 Acoustic design of schools: performance standards.
- [65] SN/SIA (2006) - SN 520181/SIA 181 Protection contre le bruit dans le bâtiment.
- [66] NIJS, L.; SCHUUR, A. (2020) - Expressing legal demands in acoustical quantities; is the reverberation time a good predictor for the speech intelligibility in a sports hall? 2020.
- [67] LUBMAN, D. (2004) - Donald Bren School of Environmental Science & Management, UCSB: Building Confidence: From Sustainable Policy to Practice. In Santa Barbara, CA: 2004.
- [68] LUBMAN, D.; SUTHERLAND, Louis C. (2012) - Good Classroom Acoustics is a Good Investment. 2012.
- [69] KARABIBER, Z.; ÇELIK, E. (2001) - Estimated Cost for Improving Acoustical Comfort Conditions of an Existing Classroom. [Em linha].
- [70] BARONE, Antonio; PICCIONI, Roberto - Acoustic reclamation in a school gym. [Em linha].
- [71] MINISTÉRIO DO AMBIENTE, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional (2008) - Diário da República n.º 110/2008, Série I de 2008-06-09 - Decreto-Lei n.º 96/2008.
- [72] BB (2015) - BB93: acoustic design of schools - performance standards.
- [73] GUIDES, MESH - Acoustic Standards and guidance [Em linha]. [Consult. Disponível em WWW: <<https://www.meshguides.org/guides/node/150>>].
- [74] SEEP, Benjamin [et al.] (2000) - Classroom Acoustics: A Resource for Creating Environments with Desirable Listening Conditions. [Em linha].
- [75] ANSI/ASA (2010) - ANSI/ASA S12.60 PART 1 American National Standard Acoustical Performance Criteria, Design Requirements, and Guidelines for Schools, Part 1: Permanent Schools.
- [76] --- (2003) - ANSI S12.60-2002 Acoustical Performance Criteria, Design Requirements and Guidelines for Schools.
- [77] CTE (2007) - Real Decreto 1371/2007, de 19 de octubre (BOE 23-octubre-2007) - DB HR Protección frente al ruido.
- [78] --- (2019) - Real Decreto 732/2019 de 20 de diciembre (BOE 27-diciembre-2019) - Documento Básico HR Protección frente al ruido
- [79] ABNT (2019) - ABNT NBR 10151:2019 Acústica - Medição e avaliação de níveis de pressão sonora em áreas habitadas - Aplicação de uso geral.
- [80] --- (2017) - ABNT NBR 10152:2017 Acústica — Níveis de pressão sonora em ambientes internos a edificações.

- [81] SILVA, Nadyeska Bruna Copat; SILVA MOTTA, Bárbara Lorryne; SOARES, Paulo Fernando (2018) - A legislação sobre o ruído e tempo de reverberação: O comparativo nacional e internacional. Revista Brasileira de Engenharia e Sustentabilidade [Em linha]. 5:2. 7-13. ISSN 2448-1661.
- [82] MEALINGS, Kiri (2016) - Classroom acoustic conditions: Understanding what is suitable through a review of national and international standards, recommendations, and live classroom measurements.
- [83] AS/NZS (2016) - AS/NZS 2107:2016 Acoustics - Recommended design sound levels and reverberation times for building interiors.
- [84] CONSULTANTS, Association of Australasian Acoustical (2018) - Guideline for Educational Facilities Version 2.0
- [85] LEITE, ESSL - Escola Secundária Serafim - A História [Em linha]. [Consult. 05/12/2020]. Disponível em WWW: < <http://essl.pt/index.php/agrupamento/da-eps-dr-serafim-leite/a-historia>>.
- [86] CMSJM - Câmara assinou contrato para a obra de requalificação da Escola Serafim Leite [Em linha]. [Consult. 10/12/2020]. Disponível em WWW: < <https://www.cm-sjm.pt/pt/noticias/15-obras/1034-camara-assinou-contrato-para-a-obra-de-requalificacao-da-escola-serafim-leite>>.
- [87] ISO (2008) - EN ISO 3382:-2:2008, Acoustics – Measurement of room acoustic parameters – Part 2: Reverberation time in ordinary rooms.
- [88] BERGLUND, Birgitta [et al.] (1999) - Guidelines for community noise. Geneva: World Health Organization.
- [89] ISO (2009) - NP EN ISO 140-4:2009 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.
- [90] --- (2014) - ISO 16283-1:2014 Acoustics — Field measurement of sound insulation in buildings and of building elements — Part 1: Airborne sound insulation.
- [91] --- (2008) - NP EN ISO 140-7:2008 Acústica. Medição do isolamento sonoro de edifícios e de elementos de construção. Parte 7: Medição, in situ, da transmissão de sons de percussão de pavimentos.
- [92] --- (2020) - EN ISO 16283:2:2020, Acoustics – Field measurement of sound insulation in buildings and of building elements – Part 2: Impact sound insulation.
- [93] CARPIN - PRODUTOS ARCHIWOODXXI [Em linha]. [Consult. 26/12/2020].
- [94] --- (2018) - Ficha Técnica do Produto [Em linha]. [Consult. 26/12/2020]. Disponível em WWW: < <https://carpin.pt/data/filemanager/public/fichas-tecnicas-ac/ft-a-ac29db-1f.pdf>>.
- [95] VITROCHAVES - AKUSTEX [Em linha]. [Consult. 16/12/2020]. Disponível em WWW: < [http://www.vitrochaves.com/wp-content/uploads/2020/05/AKUSTEX\\_PT\\_01\\_20\\_Web.pdf](http://www.vitrochaves.com/wp-content/uploads/2020/05/AKUSTEX_PT_01_20_Web.pdf)>.
- [96] SPECIALIST, NCS - Noise Control - EcoLine Acoustic Ceiling Baffles [Em linha]. [Consult. 05/01/2020]. Disponível em WWW: < <https://noisecontrolspecialist.com/product/ecoline-acoustic-ceiling-baffles/>>.
- [97] ACOUSTIC, BASWA - [Em linha]. [Consult. 05/01/2020]. Disponível em WWW: < <https://www.baswana.com/>>.
- [98] STIER - SOCIEDADE TÉCNICA DE ISOLAMENTOS E ENERGIAS RENOVÁVEIS, Lda. - SonaSpray Celulose Projectada - A solução acústica e térmica definitiva Para tectos e paredes [Em linha]. [Consult. 05/01/2020]. Disponível em WWW: < <http://stier-acustica.com/Ficheiros.ashx?i=11846>>.
- [99] --- - Sonacrete Premium Acoustical Finishes [Em linha]. [Consult. 05/01/2020]. Disponível em WWW: < <http://stier-acustica.com/Ficheiros.ashx?i=11849>>.
- [100] --- - SONACOUSTIC revestimento acústico para tectos e paredes. [Em linha]. [Consult. 05/01/2020].
- [101] ACOUSTIC, BASWA - BASWA Acoustical Plaster [Em linha]. [Consult. 05/01/2020]. Disponível em WWW: < [https://assets.website-files.com/5dd319e0c0716e24f0a4fb4a/5e2ff4795251e10873251c50\\_BASWA\\_Test\\_Data\\_Sheet\\_BASWA\\_Acoustical\\_Plaster\\_EN\\_19-0412.pdf](https://assets.website-files.com/5dd319e0c0716e24f0a4fb4a/5e2ff4795251e10873251c50_BASWA_Test_Data_Sheet_BASWA_Acoustical_Plaster_EN_19-0412.pdf)>.
- [102] SILÊNCIO - BAFFLE SILENTIUM BT50 STANDARD [Em linha]. [Consult. 05/01/2020]. Disponível em WWW: < <https://noisecontrolspecialist.com/product/ecoline-acoustic-ceiling-baffles/>>.